

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА:**  
**Електричні та магнітні кола. Електричні машини**  
**Лабораторний практикум**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Електротехніка: Електричні та магнітні кола. Електричні машини: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. В.П. Грудська, О.М. Скринник – Електронні текстові дані (1 файл: 1,6 Мбайт). – м. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019 – 180 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 01 . 04 . 2019 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 8 від 25 . 03 . 2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА:**

### **Електричні та магнітні кола. Електричні машини**

#### **Лабораторний практикум**

Укладачі	Грудська В.П., канд.техн.наук, доц. Скринник О.М., асистент
Відповідальний редактор	Сільвестров А.М., докт. техн. наук., проф.
Рецензенти	Реуцький М.О., канд.техн.наук, доц. кафедри електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського Кириленко В.М., канд.техн.наук, доц. кафедри відновлюваних джерел енергії

Навчальний посібник призначений для підготовки та виконання лабораторних робіт з розділів «Електричні та магнітні кола» і «Електричні машини» дисципліни «Електротехніка». Зміст кожної роботи має таку структуру: мета роботи; теоретичні і розрахункові положення; порядок виконання роботи; методичні вказівки до обробки дослідних даних; контрольні питання.

Даний посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

## Передмова

З метою підвищення учбової активності і особистої відповідальності студентів за результати навчання в учбовий процес впроваджуються нові технології, які передбачають адаптацію кожної форми аудиторних занять до відповідної спеціальності майбутніх фахівців.

Так, для студентів, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем», у програмі навчальної дисципліни «Електротехніка» акцент перенесено з практичних занять на лабораторний практикум, в якому гармонічно поєднані теоретична і прикладна сторони загальної електротехніки. Даний лабораторний практикум відрізняється від попередніх тим, що повніше враховує вимоги нової програми, а також дещо компенсує відсутність практичних занять з електротехніки для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Відповідно до програми викладений цикл лабораторних робіт складається з двох розділів: «Електричні та магнітні кола» і «Електричні машини».

Виконуючи лабораторні роботи з розділу «Електричні та магнітні кола» студенти набувають вміння:

- використовувати сучасні вимірювальні та контрольні прилади;
- моделювати усталені режими роботи лінійних і нелінійних електричних та магнітних кіл постійного і змінного струму;
- на підставі дослідних даних та їхньої математичної і графічної обробки проводити порівняльний аналіз електромагнітних процесів у зазначених колах;
- аналізувати перехідний процес, який виникає в електричних колах при підключенні до джерел постійної та змінної напруги.

У процесі виконання лабораторних робіт з розділу «Електричні машини» студенти ознайомлюються з типовими електротехнічними пристроями, що

входять до складу обладнання сучасних наукових лабораторій та промислових підприємств, і навчаються:

- розрізняти електроустаткування за зовнішніми ознаками;
- за паспортними даними пристроїв правильно вибирати режими роботи;
- виконувати пуск і регулювання частоти обертання найбільш поширених в інженерній практиці двигунів постійного та змінного струму;
- за робочими характеристиками двигунів розраховувати з яким ККД і коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi$  вони будуть працювати у тому чи іншому режимі;
- дослідним та розрахунковим шляхом визначати спад напруги у трансформаторах і генераторах постійних і змінних сигналів при навантаженнях різного типу;
- керуючись регульовальною характеристикою генератора, підтримувати незмінною напругу на його виході за зміни навантаження;
- використовувати синхронну машину як компенсатор реактивної потужності для підвищення  $\cos \varphi$ .

Лабораторний практикум структуровано наступним чином: 1) мета роботи; 2) теоретичні положення і розрахункові співвідношення, які висвітлюють зміст роботи; 3) порядок виконання роботи; 4) математична і графічна обробка дослідних даних; 5) результати роботи, подані у вигляді висновку; 6) контрольні питання для перевірки степені опрацювання і засвоєння досліджуваного матеріалу.

Слід відмітити, що через відсутність практичних занять теоретичні та розрахункові положення викладено більш детально, ніж зазвичай у методичних вказівках.

Лабораторний практикум орієнтований на підвищення зацікавленості студентів у вивченні курсу електротехніки, на розвиток їхньої спостережливості та допитливості. Найбільш ефективним для проведення

лабораторних робіт є дослідницький метод, коли після короткого усного або письмового інструктажу студенти самостійно ведуть спостереження і виміри, імітуючи науковий пошук. Для підвищення активності студентів група ділиться на бригади з трьох осіб, що дозволяє кожному студенту набути навички самостійного проведення експерименту. Лабораторна робота проводиться під керівництвом викладача, який контролює підготовку кожного студента (наявність протоколу, знання мети роботи, тощо), слідкує за правильністю виконання експерименту, перевіряє та підписує отримані результати. Для зарахування з певними балами лабораторної роботи студент повинен оформити протокол-звіт і відповісти по суті виконаної роботи.

### **Рекомендації щодо оформлення протоколу лабораторної роботи**

Важливою складовою практичної підготовки майбутніх фахівців є набуття ними вміння якісно оформлювати проведенні дослідницькі роботи шляхом складання відповідного протоколу (зразок включено у зміст кожної роботи). При оформленні протоколу потрібно дотримуватись правил, викладених нижче.

1. Усі зображені в протоколі електричні схеми мають бути накреслені за допомогою лінійки і циркуля.

2. Щоб запобігти помилці, результати кожного досліду має перевірити керівник. При одержанні неправильних даних дослід необхідно повторити. Тільки після перевірки керівником відповідності результатів дослід можна отримані дані заносити у таблицю.

3. У процесі математичної обробки дослідних даних слід записувати усі формули що використовуються при розрахунках, а в разі складних розрахунків дати проміжні величини, потрібні для визначення кінцевого результату.

4. При графічній обробці даних на осях координат слід обов'язково вказувати масштаб, позначення величини і одиниць, в яких вони відображені.

Усі точки, знайдені дослідним шляхом, треба з'єднувати плавною лінією (краще за допомогою лекал). Не дозволяється перетинання кривої через одну точку.

Якщо графіки показують результати однорідних спостережень за однакових умов, то їх доцільно будувати в одній координатній системі, причому графіки мають відрізнятися особливими позначками нанесених точок (хрестиками, кружками, точками).

У випадку, коли дві-три різнорідні функції мають однаковий аргумент, наприклад  $U(\omega)$ ,  $I(\omega)$ ,  $\cos\varphi(\omega)$ , то їх можна зобразити в одній координатній площині. По осі абсцис слід відкласти у вибраному масштабі аргумент (у даному прикладі  $\omega$ ), і ця вісь буде спільною для графіків. Для кожної з величин ( $U$ ,  $I$ ,  $\cos\varphi$ ) має бути окрема вісь ординат з відповідним масштабом. Можна використати одну вісь ординат за різних величин, але тоді їх необхідно відкладати у відносних одиницях і обов'язково вказати які величини прийняті за базисні.

5. Висновки висвітлюють вміння дослідника аналізувати і оцінювати результати досліджень, тому їх потрібно формулювати чітко, коротко і по суті роботи.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### НАБУТТЯ ВМІННЯ СКЛАДАТИ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА І ВИКОРИСТОВУВАТИ ПОШИРЕНІ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

**Мета роботи:** ознайомлення з лабораторними стендами і електровимірювальними приладами різних систем; визначення похибок вимірювань.

#### 1.1 Основні теоретичні положення

В електротехнічній практиці найбільш широкого застосування отримали електромеханічні та електронні електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки. Прикладом таких приладів можуть бути амперметри, вольтметри, ватметри і т. ін.

Електромеханічні прилади порівняно із електронними значно простіші, надійніші і дешевші. В залежності від типу вимірювального механізму вони поділяються на магнітоелектричні, електромагнітні і електродинамічні.

Принцип дії магнітоелектричних приладів ґрунтується на взаємодії магнітного поля постійного магніту і рухомої котушки із струмом. Ці прилади мають рівномірну шкалу, відрізняються високою точністю та чутливістю, невеликою потужністю споживання електричної енергії. Магнітоелектричні прилади дозволяють визначити як величину так і напрям постійного струму або напруги. Один із затискачів приладів позначається знаком «—», другий «+».

Електровимірювальні прилади магнітоелектричної системи знаходять використання також при вимірах в колах змінного струму. В цьому випадку в коло вимірювальної котушки вмикають перетворювач змінного струму в постійний або пульсуючий струм. Відхилення стрілки приладу пропорційне

середньому значенню струму. Для розширення меж виміру цих приладів використовуються додаткові пристрої – шунти і додаткові опори.

Принцип дії електромагнітних приладів ґрунтується на втягуванні сталюого осердя в нерухому котушку із струмом. Ці прилади використовуються для виміру постійних та змінних струмів і напруг. Вони відрізняються простою конструкцією, високою здатністю до перевантаження, надійністю в експлуатації, низкою вартістю. До недоліків приладів потрібно віднести меншу точність виміру порівняно із магнітоелектричною системою приладів, більшою потужністю споживання електроенергії, нерівномірністю шкали, залежністю від зовнішніх магнітних полів, а також обмеженим діапазоном частот змінного струму. Для розширення меж виміру змінних струмів і напруг використовуються вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Електромагнітні прилади показують діюче значення вимірюваного струму та напруги.

Принцип дії електродинамічної системи приладів ґрунтується на взаємодії струмів в різних котушках одна із яких нерухома, а друга міняє своє положення відносно першої. Шкали вольтметрів і амперметрів - нерівномірні, а ватметрів - практично рівномірні.

Електродинамічні прилади забезпечують найбільш високу точність виміру при частотах змінного струму до 20 кГц. Недоліками їх є значна потужність споживання електроенергії, низька перенавантажувальна властивість.

Серед електродинамічних приладів найбільшого поширення набули ватметри. У ватметра два вимірювальних кола: послідовне коло (обмотка струму), яке вмикається послідовно із дослідженою ділянкою кола і паралельне коло (обмотка напруги) – яке вмикається паралельно цій ділянці кола. “Початок” паралельної і послідовної обмоток ватметра позначаються



позначкою «\*». Електродинамічні ватметри показують середнє значення потужності.

Електрична схема ввімкнення амперметра, вольтметра і ватметра показана на рис. 1.1.

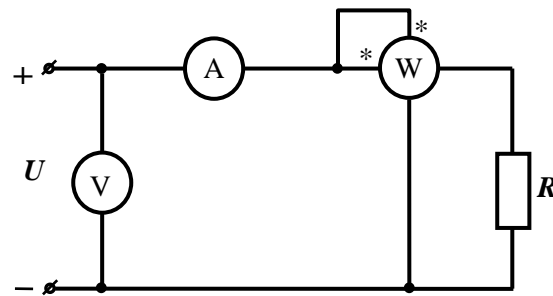


Рис. 1.1

Електровимірювальні прилади виготовляються із однією або кількома межами виміру. Межа виміру амперметра визначається номінальним струмом, межа вольтметра – номінальною напругою, межа ватметра – номінальною напругою і струмом. Номінальні напруга або струм позначені біля затискачів або перемикача меж вимірювання приладу.

Окрім цільового призначення і позначення меж виміру електровимірювального приладу на шкалі позначається:

а) Характер струму, на який розрахований прилад:

— – прилад постійного струму,

~ – прилад змінного струму,

⎓ – універсальний прилад, придатний для використання в колах постійного і змінного струмів,

⏚ – прилад трифазного струму.


б) Система вимірювального механізму:


⦿ – магнітоелектрична

⚡ – електромагнітна

⦿ – електродинамічна

в) Нормальне робоче положення приладу:

 або  $\rightarrow$  – горизонтальне,

 або  $\uparrow$  – вертикальне.



г) Клас точності приладу:

для електровимірювальних приладів встановленні такі класи точності:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0

д) Номінальна частота або діапазон частот,

е) Рівень випробувальної напруги

наприклад  2кВ або .

На приладах вказується заводський номер, рік випуску та інші умовні позначення.

Ціна поділки приладів визначається із співвідношення

$$C_U = U_{\text{ном}}/N, \text{ вольт на одну поділку;}$$

$$C_I = I_{\text{ном}}/N, \text{ ампер на одну поділку;}$$

$$C_P = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}/N, \text{ ват на одну поділку;}$$

де  $N$  - кількість поділок шкали відповідно вольтметра, амперметра, ватметра.

**Приклад 1.** Амперметр має межі вимірів 2,5А; 5А і шкалу із 100 поділками. Для кожної із границь вимірювання ціна поділки  $C$  буде відповідно дорівнювати: при ввімкненні на 2,5А –  $C_I = 2,5/100=0,025\text{А/под.}$

при ввімкненні на 5А –  $C_I = 5/100=0,05\text{А/под.}$

**Приклад 2.** Ватметр має границі виміру по струму 2,5А; 5А, по напрузі 75; 150; 300В, число поділок 150.

Ціна поділки для такого прикладу зведена в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Номінальна напруга, В	Ціна поділки Вт/под	
	$I_n = 2,5\text{А}$	$I_n = 5\text{А}$
75	1,25	2,5
150	2,5	5
300	5	10

Всі електровимірювальні прилади дають наближені значення вимірювальних величин. Дійсні (істинні) знаходяться із врахуванням відповідних похибок. Абсолютна похибка – різниця між виміром приладу і дійсним значенням вимірювальної величини.

$$\Delta A = A_B - A_D$$

де  $\Delta A$  – абсолютна похибка;  $A_B$  – значення виміряне приладом;  $A_D$  – дійсне значення вимірювальної величини.

Відносна похибка  $\gamma$ , як правило, визначається у відсотках

$$\gamma = \Delta A / A_D \cdot 100$$

Так як дійсне значення вимірювальної величини невідоме, то для визначення найбільших похибок вимірів користуються класом точності приладів. Окремим типам вимірювальних приладів встановлюють різні класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Значення класу точності приладу у вигляді числа визначає найбільшу допустиму основну приведену похибку  $\gamma_{np}$  виражену у відсотках. Її знаходять, як відношення максимальної похибки до кінцевого значення робочої частки шкали приладу.

$$\gamma_{np} = (\Delta A)_{\max} / A_{\text{ном}} \cdot 100 = (A_{\text{п}} - A_{\text{д}}) / A_{\text{ном}} \cdot 100$$

Наприклад, прилад класу 1,5 має  $\gamma_{np} = \pm 1,5\%$

Відносна похибка вимірювання може бути найдена

$$\gamma = \gamma_{np} \cdot (A_{\text{ном}} / A_{\text{д}})$$

Звідси виходить, що відносна похибка вимірювання залежить від дійсного значення вимірювальної величини та зростає при її зменшенні. З цієї ж причини вимірювальний прилад або його границю вимірювання вибирають так, щоб при вимірюванні стрілка приладу по можливості знаходилась в середній частині шкали.

**Приклад 3.** Є магнітоелектричний вольтметр, який має клас точності 0,5. Знайти абсолютну, відносну похибки вимірювання цим

вольтметром для напруг  $U_1 = 30\text{В}$ ,  $U_2 = 120\text{В}$ , а також записати дійсні значення вимірювальних напруг.

### Рішення

Абсолютна похибка вимірювання

$$\Delta U = (\gamma_{np} U_{\text{ном}}) / 100 = (\pm 0,5 \cdot 150) / 100 = \pm 0,75 \text{ В}.$$

Дійсне значення вимірювальної напруги  $U_1$

$$U_{\text{д}} = U_1 \pm \Delta U = (30 \pm 0,75) \text{ В}.$$

Відносна похибка вимірювання для  $U_1$

$$\gamma = (\Delta U / U_{\text{д}}) \cdot 100 = (\pm 0,75 / (30 \pm 0,75)) \cdot 100 = (2,56 \dots 2,44) \%.$$

Дійсне значення вимірювальної напруги  $U_2$

$$U_{\text{д}} = U_2 \pm \Delta U = (120 \pm 0,75) \text{ В}.$$

Відносна похибка вимірювання для  $U_2$

$$\gamma = (\Delta U / U_{\text{д}}) \cdot 100 = (0,75 / (120 \pm 0,75)) \cdot 100 = (0,63 \dots 0,62) \%$$

Методична похибка вимірювання. Важливою характеристикою приладів є їх споживання енергії з вимірювального кола. Для приведення в рух відлікового механізму зі стрілкою необхідна енергія, що відбирається з вимірювального кола, змінюючи при цьому його режим. Для амперметрів і вольтметрів нормують не споживання, а вхідний опір ( $R_A$  чи  $R_V$ ) приладу. Ввімкнення електромеханічного приладу в малопотужну схему може суттєво змінити струм у її вітках та спад напруг на її елементах, у результаті показ приладу не відповідатиме значенню вимірювальної величини, тобто виникає похибка, що залежить від вхідного опору приладу.

## 1.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з вимірювальними приладами та апаратами, які застосовують у роботі. Записати їх паспортні данні в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

№ п/п	Прилади і апарати	Позначення в схемі	Вимірювальний механізм або тип	Клас точності	Межа вимірювання або номінальні параметри	Шкала	Ціна ділення	Примітки
1.								
2.								
3.								
Приклад заповнення таблиці								
1.	Вольтметр		електро- магнітна	0,5	150 В	100 под	1,5 В/под	Інв. №506

2. Скласти коло згідно рис. 1.2 і виміряти величини у відповідності з табл.1.3

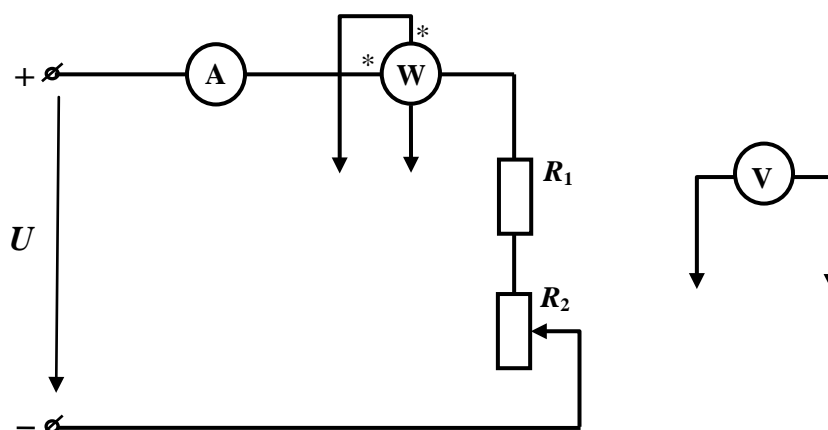


Рис. 1.2

Таблиця 1.3

Результати вимірювань							Результати обчислень									
U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	C <sub>U</sub>	C <sub>I</sub>	C <sub>P</sub>	Наближені значення						
										U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I	P	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
под							В/под	А/под	Вт/под	В			А	Вт		

### 1.3 Опрацювання результатів досліджень

1. За даними таблиці 1.3, зробити потрібні обчислення. Їх результати записати у відповідні графи таблиці.
2. Користуючись даними таблиці 1.3, визначити абсолютну та відносні похибки вимірювання, а також дійсне значення вимірювальних величин.
3. Визначити дійсне значення опору.
4. Для існуючих приладів перевірити чи будуть резистори лінійними (опір  $R$  незмінним) з урахуванням точності вимірювання напруги і струму.
5. Порівняти потужності отримані за допомогою ватметра і розраховані непрямым вимірюванням за допомогою вольтметра та амперметра. Зробити висновок про виконану роботу.

### 1.4 Контрольні питання

1. Пояснити будову і принцип дії приладів магнітоелектричної, електромагнітної та електродинамічної систем вимірювання.
2. Пояснить переваги та недоліки приладів основних систем вимірювання.
3. Пояснить на які значення вимірювальних величин реагують прилади основних систем вимірювання.
4. Як визначити ціну поділки електровимірювального приладу?
5. Як визначається абсолютна, відносна та основна приведена похибки приладів?
6. Що означає клас точності приладу?
7. Як знайти дійсне значення вимірювальних величин?
8. Є вольтметр магнітоелектричної системи з межею вимірювання 50 В і внутрішнім опором 800 Ом. Як можна розширити межу вимірювань до 600 В?
9. Є амперметр магнітоелектричної системи з межею вимірювань 1 А і внутрішнім опором 0,5 Ом. Як можна розширити межу вимірювань до 5 А?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ ОМА ТА КІРХГОФА

**Мета роботи:** навчитися визначати ЕРС джерела живлення, його внутрішній опір; експериментально перевірити закони Ома та Кірхгофа.

#### 2.1 Основні теоретичні відомості

Електричне коло – це сукупність пристроїв, що утворюють шлях для проходження електричного струму, електромагнітні процеси в яких можна описати за допомогою понять про електрорушійну силу, струм і напругу. Призначення електричного кола полягає в виробленні, передачі, розподілі і взаємному перетворенні електромагнітної енергії і деяких інших видів енергії. Елементи електричного кола – це окремі пристрої, що входять до складу кола та виконують в ньому певні функції. Основні елементи електричних кіл – джерела і споживачі електричної енергії. У споживачах електрична енергія перетворюється у теплову, механічну, світлову та інші види енергії. В джерелах – теплова, механічна, світлова, хімічна енергія перетворюється в електричну. У процесі перетворення різних видів енергії в електричну у джерелі виникає ЕРС (електрорушійна сила), яка спричинює електричний струм у замкненому колі. В ході цього перетворення частина енергії втрачається в самому джерелі. Тому джерела характеризуються двома параметрами – ЕРС  $E$  та внутрішнім опором  $R_0$ . Споживачі енергії характеризуються тільки опором  $R$ .

Для зображення і розрахунку електричних кіл заміняють електричними схемами, використовуючи умовні зображення. Найпростіше електричне коло зображено на рис. 2.1. Струм у цьому колі та напругу на його ділянках визначають за допомогою закону Ома, який можна використати як для усього кола, так і для окремих його ділянок.

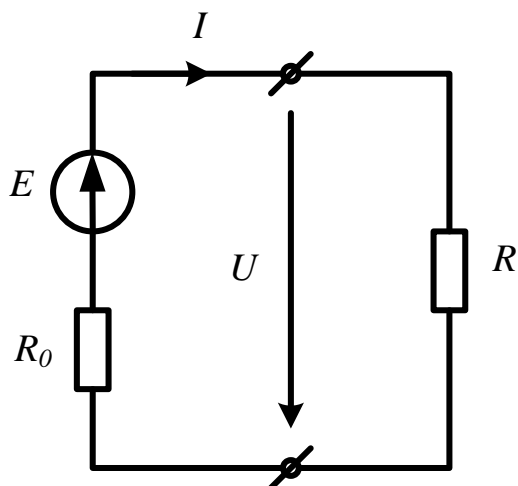


Рис. 2.1

Закон Ома:

$$\begin{aligned} \text{для всього кола} \quad I &= \frac{E}{R_0 + R}; \\ \text{для ділянки без ЕРС} \quad I &= \frac{U}{R}; \\ \text{для ділянки з ЕРС} \quad I &= \frac{E - U}{R_0}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Де  $I$  – електричний струм;

$U$  – електрична напруга на споживачі;

$R_0$ ,  $R$  – опори джерела та споживача відповідно.

За законом Ома експериментально можна визначити параметри електричного кола, якщо виміряти струм  $I$  та напругу  $U$ .

Із другого рівняння системи (2.1) визначимо опір споживача:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (2.2)$$

Третє рівняння із системи (2.1) дає змогу визначити параметри джерела. Якщо записати  $I \cdot R_0 = E - U$  або  $E = U + I \cdot R_0$ , то в режимі холостого ходу, коли  $I = 0$

$$E = U_{x.x}, \quad (2.3)$$

тобто ЕРС джерела дорівнює напрузі на його розімкнених затискачах.

Коли відомі ЕРС джерела та напруга на його затискачах, легко визначити його внутрішній опір:

$$R_0 = \frac{E - U}{I}. \quad (2.4)$$

Простим називається коло, що складається з одного джерела електричної енергії та будь-якої кількості послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії, які поступовим перетворенням можна звести до одного еквівалентного опору. Складним називають коло, в якому групи споживачів не можна звести



до одного еквівалентного опору. Ділянка кола, вдовж якої струм в будь-який момент часу має одне й те саме значення, називається гілкою; точка, в якій з'єднуються три або більше гілки називається вузлом. Будь-який замкнений шлях, утворений декількома гілками, являє собою контур. Контур, в який входить хоча б одна нова гілка, називається незалежним.

Перший закон Кірхгофа випливає із закону повного струму. Його можна сформулювати двояко.

1. Алгебраїчна сума струмів, що сходяться в будь-якому вузлі електричного кола, дорівнює нулю (струми, які входять до вузла, враховують з одним знаком, які виходять з вузла – з іншим):

$$\sum I = 0. \quad (2.5)$$

2. Сума струмів, які входять в будь-який вузол електричного кола, дорівнює сумі струмів, які виходять з цього вузла:

$$\sum I_{\text{вх}} = \sum I_{\text{вих}}. \quad (2.6)$$

Другий закон Кірхгофа також можна сформулювати двояко.

1. Алгебраїчна сума ЕРС, які діють в будь-якому контурі електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг на всіх опорах контуру:

$$\sum E = \sum I \cdot R. \quad (2.7)$$

Визначаючи  $\sum E$  та  $\sum I \cdot R$  зі знаком «+» враховують  $E$  та  $I$ , напрям яких збігається з обраним напрямом обходу контуру.

1. Алгебраїчна сума напруг, які діють у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю:

$$\sum U = 0. \quad (2.8)$$

Метод розрахунку, який базується на застосуванні законів Кірхгофа, є класичним і основним для розрахунку складних електричних кіл. Інші методи розрахунку ґрунтуються на цих законах, і мета їх використання – зменшити трудомісткість розрахунків.

Струми у колі, яке досліджується в даній лабораторній роботі, розраховують за допомогою законів Кірхгофа. Методику розрахунку покажемо на конкретному прикладі (рис. 2.2а).

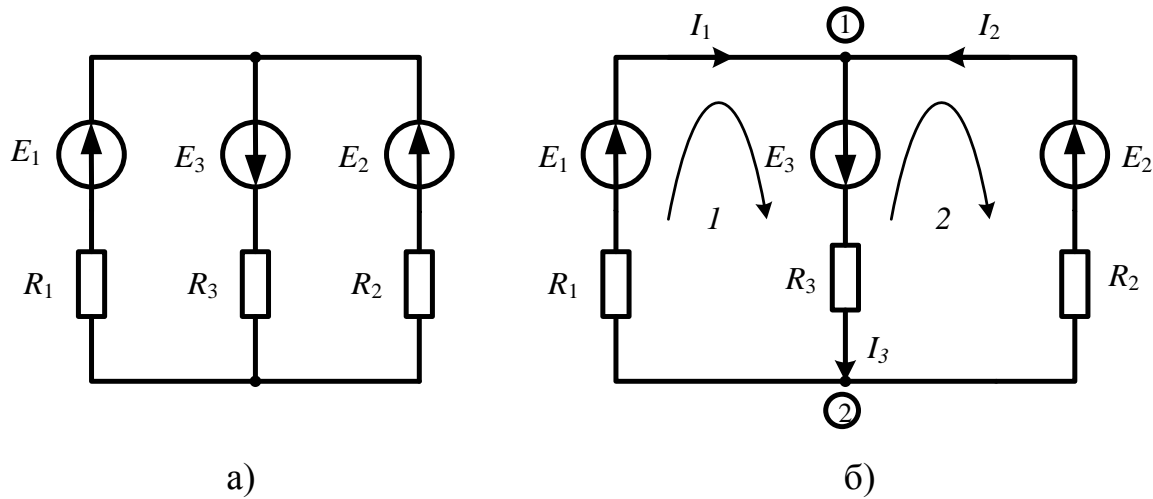


Рис. 2.2

1. Для схеми рис. 2.2а визначаємо кількість вузлів  $n$  і гілок  $m$ :  $n = 2$ ,  $m = 3$ .

2. Визначаємо кількість незалежних рівнянь, які необхідно скласти за законами Кірхгофа. Схема містить три гілки, в кожній з яких протікає свій струм, отже загальне число рівнянь для цього кола дорівнює трьом.

3. З першим законом складають  $(n - 1)$  незалежне рівняння, в даному випадку 1. За другим законом складають  $(m - n + 1)$  незалежне рівняння. Для даного кола  $3 - 2 + 1 = 2$  рівняння (слід відзначити, що кількість рівнянь, які складаються за другим законом Кірхгофа, дорівнює числу незалежних контурів).

Довільно вибираємо позитивний напрям струмів  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  (рис. 2.2б) і складаємо рівняння за першим законом Кірхгофа для будь-якого з вузлів, наприклад, для вузла 1 (струми, що входять в вузол, враховуємо зі знаком «+», струми, які виходять з вузла, із знаком «-»):

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Довільно задаємо напрям обходу незалежних контурів 1 і 2 та складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

- 1 контур  $E_1 + E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3,$
- 2 контур  $-E_2 - E_3 = -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3$  або  $E_2 + E_3 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3.$

Розв'язуючи систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 &= E_1 + E_3 \\ I_2 R_2 + I_3 R_3 &= E_2 + E_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

отримуємо невідомі струми  $I_1, I_2, I_3$ .

Необхідно відзначити, що в результаті розв'язання рівнянь можна отримати від'ємне значення будь-якого струму. Це означає, що дійсний напрям струму є оберненим раніше довільно обраному. Слід пам'ятати, що порядок розрахунку кола за методом законів Кірхгофа не залежить від того, які величини задані, а які потрібно визначити. Так, за відомими значеннями струмів і опорів можна розрахувати ЕРС; за відомими ЕРС і струмами – опори тощо.

## 2.2 Обладнання, яке використовується при виконанні роботи

1. Джерела постійної напруги, одне – регульоване, інше – нерегульоване з напругою на виході 20-24В.
2. Споживачі енергії  $R_1, R_2, R_3$ .
3. Вимірювальні прилади: амперметр, вольтметр.

## 2.3 Порядок виконання роботи

1. Визначення параметрів основних елементів електричного кола.
  - 1.1. Визначення величини ЕРС  $E$  та величини внутрішнього опору  $R_0$  кожного джерела.

1.1.1. Підключивши вольтметр до кожного джерела, виміряти їх ЕРС  $E_1$  та  $E_2$  і записати їх значення у таблицю 2.1.

1.1.2. Скласти коло, показане на рис. 2.3. Ввімкнути нерегульоване джерело живлення і виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою  $R_0 = \frac{E - U}{I}$  і записати його значення у табл.2.1.

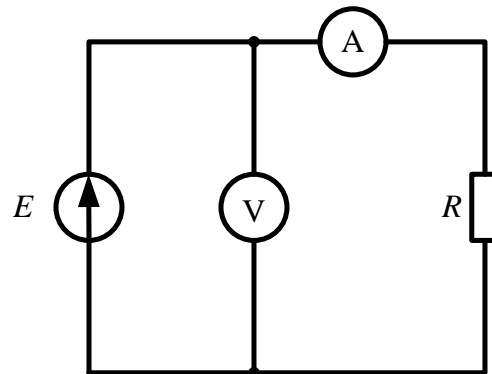


Рис. 2.3

1.1.3. У колі, показаному на рис. 2.3. замінити нерегульоване джерело живлення регульованим і виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою  $R_0 = \frac{E - U}{I}$  і записати його значення у табл.2.1.

Таблиця 2.1.

$E_1$ [В]	$R_{01}$ [Ом]	$E_2$ [В]	$R_{02}$ [Ом]	$R_1$ [Ом]	$R_2$ [Ом]	$R_3$ [Ом]

1.2. Визначити величину опору навантаження, позначеного як  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Для цього потрібно виконати наступне:

1.2.1. Резистор, величина опору якого буде визначатися, підключити до будь-якого джерела по схемі на рис. 2.3.

1.2.2. Виміряти напругу і струм у колі.

1.2.3. Розрахувати величину опору резистора, користуючись законом Ома:  $R = U/I$ .

Повторити п.1.2.1.-1.2.3 для кожного резистора. Отримані результати записати у табл.2.1.

## 2. Перевірка у ході експерименту справедливості законів Кірхгофа.

### 2.1. Скласти коло зображене

на рис. 2.4.

2.2. Перевірити справедливості першого закону Кірхгофа. Для цього потрібно:

2.2.1. Виміряти струми з урахуванням їх знаків та занести у табл. 2.2. Для правильного урахування знаку струму необхідно

дотримуватись однакового підключення амперметра у кожен гілку (наприклад, затискач амперметра позначений «\*» включати у верхнє гніздо, а затискач, позначений «mA» – у нижнє).

2.2.2. Вказати на схемі напрям струмів. За позитивний обирається напрям струму від затискача амперметра «mA» до затискача «\*». Напрямок струму від «\*» до «mA» вважати негативним.

2.2.3. За результатами вимірювань переконатися у виконанні першого закону Кірхгофа.

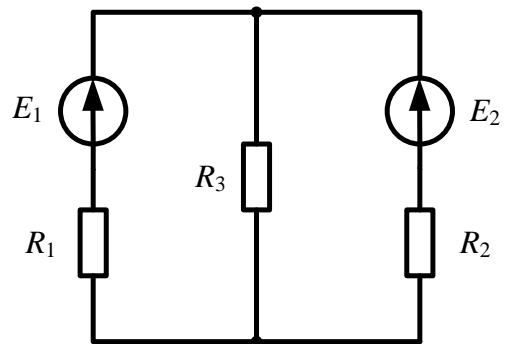


Рис.2.4

Таблиця 2.2.

$I_1, [A]$	$I_2, [A]$	$I_3, [A]$	$U_{E1} [B]$	$U_{E2} [B]$	$U_{R1} [B]$	$U_{R2} [B]$	$U_{R3} [B]$

2.3. Перевірити справедливості другого закону Кірхгофа. Для цього необхідно:

2.3.1. Позначити полярність напруг на всіх ділянках кола. Струм через резистор тече в напрямку зменшення потенціалу, тобто від точки з більшим потенціалом «+» до точки з меншим потенціалом «-». Напрямок напруги завжди має напрям від «+» до «-». Тому на резисторі напрямки напруги і струму збігаються.

Для джерел ЕРС спрямована від «–» до «+», тому напруга на затискачах джерела ЕРС спрямована назустріч ЕРС.

2.3.2. Виміряти напруги, які вказані в табл.2.2, підключаючи вольтметр у відповідності з позначеною на схемі полярністю напруг (затискач вольтметра «V» підключати до точки «+»).

2.3.3. За результатами вимірювань напруг на різних ділянках кола розрахувати алгебраїчну суму напруг  $\sum U$  в усіх можливих контурах і переконатися у справедливості другого закону Кірхгофа.

## **2.4 Опрацювання результатів досліджень**

1. Використавши закон Ома, розрахувати за відомими значеннями ЕРС і опорів (табл.2.1) струми у гілках кола, яке показано на рис. 2.4 і порівняти їх з результатами експерименту, записаними у табл.2.2.

2. Розрахувати за законами Кірхгофа струми у колі, показаному на рис. 2.4 (значення ЕРС і опорів взяти з табл.2.1). Результати обчислень порівняти з результатами експерименту, записаними у табл.2.2.

3. Зробити висновки по роботі.

## **2.5 Контрольні питання**

1. Дайте визначення схеми заміщення електричного кола, електричного вузла, вітки, контуру, незалежного контуру.

2. Як визначається кількість незалежних контурів у схемі?

3. Чим відрізняється просте коло від складного?

4. Як дослідним шляхом визначити ЕРС джерел напруги, їх внутрішні опори, опори резисторів?

5. Якій умові мають задовольняти напруги у кожному контурі досліджуваної схеми?

6. Як за допомогою законів Ома визначити струм у вітках досліджуваного кола?

7. Як зміняться струми у вітках досліджуваного кола, якщо джерела  $E_1$  і  $E_2$  поміняти місцями, зберігаючи їх напрям?

8. Яке джерело у колі (рис. 2.4) генерує потужність, а яке споживає?

9. Як зміняться розрахунки при заміні джерела  $E_1$  на джерело відомого струму такого самого напрямку?

10. Коло має  $n$  вузлів,  $m$  віток і  $p$  джерел ЕРС. Скільки рівнянь за законами Кірхгофа потрібно скласти для розрахунку струмів? Як зміниться число рівнянь, якщо кількість джерел ЕРС збільшиться у 2 рази? Як зміниться число рівнянь, якщо у коло підключити 2 джерела із заданими струмами.

11. Який з резисторів кола (рис. 2.4) споживає найбільшу потужність?

12. Два однакових проволочених реостата з'єднані паралельно і підключені до мережі постійного струму. Перший реостат розмістили на підвіконні у теплій кімнаті, другий – за вікном на морозі. Який з реостатів споживає більшу потужність?

13. Два однакових проволочених реостата з'єднані послідовно і підключені до мережі постійного струму. Перший реостат розмістили на підвіконні у теплій кімнаті, другий – за вікном на морозі. Який з реостатів споживає більшу потужність?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ПРИНЦИПУ НАКЛАДАННЯ СТРУМІВ

**Мета роботи:** експериментально перевірити положення про незалежність дії джерел енергії (принципу накладання).

#### 3.1 Основні теоретичні відомості.

Із лінійності рівнянь, які одержані на основі законів Кірхгофа для лінійних кіл, випливає важливе положення про незалежність дії джерел енергії, яке одержало назву принципу накладання.

Принцип накладання полягає у наступному: якщо в колі діє декілька джерел енергії, то дійсний струм в кожній гілці дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які протікають в даній гілці від дії кожного джерела окремо. Метод розрахунку, який заснований на застосуванні принципу накладання, називається методом накладання. За цим методом складна схема розбивається на декілька простих схем, в кожній з яких діє тільки одне джерело енергії. Розрахунок кола методом накладання покажемо на прикладі кола рис. 3.1а.

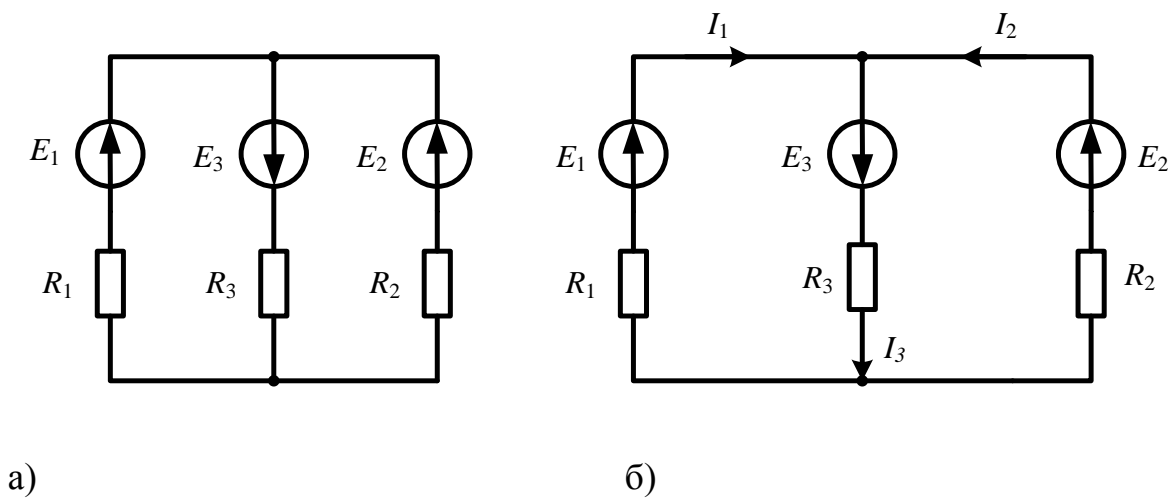


Рис. 3.1



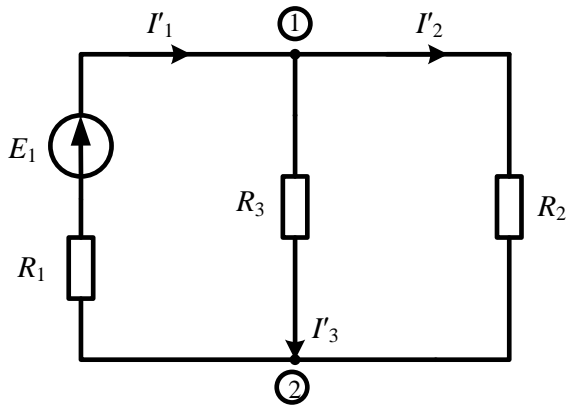


Рис. 3.2

1. Залишаємо в схемі ЕРС  $E_1$ , замінюючи джерела  $E_2$ ,  $E_3$  їх внутрішніми опорами  $R_{02} = R_{03} = 0$  (рис. 3.2). Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струму  $I'_1$ ,  $I'_2$ ,  $I'_3$  від дії  $E_1$ :

$$R_e = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad I'_1 = \frac{E_1}{R_e},$$

$$U_{12} = E_1 - I'_1 \cdot R_1, \quad I'_2 = \frac{U_{12}}{R_2}, \quad I'_3 = \frac{U_{12}}{R_3}.$$

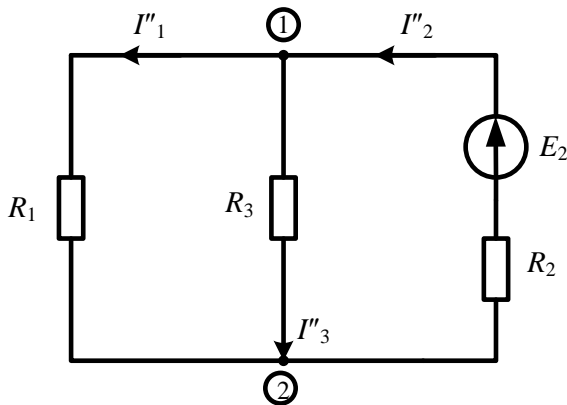


Рис. 3.3

2. Залишаємо в схемі ЕРС  $E_2$ , замінюючи джерела  $E_1$ ,  $E_3$  їх внутрішніми опорами  $R_{01} = R_{03} = 0$  (рис. 3.3). Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струму  $I''_1$ ,  $I''_2$ ,  $I''_3$  від дії  $E_2$ :

$$R_e = R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3},$$

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_e}, \quad U_{12} = E_2 - I''_2 \cdot R_2, \quad I''_1 = \frac{U_{12}}{R_1}, \quad I''_3 = \frac{U_{12}}{R_3}.$$

3. Залишаємо в схемі ЕРС  $E_3$ , замінюючи джерела  $E_1$ ,  $E_2$  їх внутрішніми опорами  $R_{01} = R_{02} = 0$  (рис. 3.4). Користуючись законом Ома, розраховуємо часткові струми  $I'''_1$ ,  $I'''_2$ ,  $I'''_3$  від дії  $E_3$ :

$$R_e = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad I'''_3 = \frac{E_3}{R_e}, \quad U_{12} = E_3 - I'''_3 \cdot R_3, \quad I'''_1 = \frac{U_{12}}{R_1}, \quad I'''_2 = \frac{U_{12}}{R_2}.$$

4. Визначаємо дійсні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , як алгебраїчну суму струмів, спричинених дією кожної ЕРС окремо. Вибираємо позитивним напрям струму  $I_1$  в заданій схемі

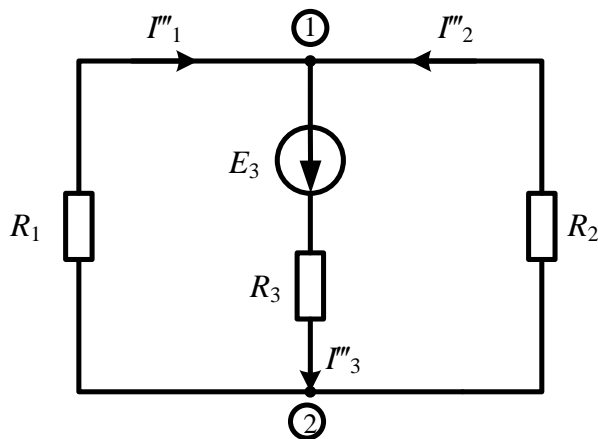


Рис. 3.4

Розраховуючи  $I_1$  часткові струми  $I'_1$  і  $I'''_1$  враховуємо зі знаком «+», оскільки їх напрям збігається з обраним позитивним напрямом струму  $I_1$ , а частковий струм  $I''_1$  - із знаком «-», оскільки його

напрямок протилежний обраному:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 + I'''_1, \quad I_2 = -I'_2 + I''_2 + I'''_2, \quad I_3 = I'_3 + I''_3 + I'''_3.$$

Слід пам'ятати, що принцип накладання не може бути використаний для розрахунку потужностей, оскільки потужність є квадратичною функцією від струму або напруги.

### 3.2 Обладнання, яке використовується при виконанні роботи

1. Джерела постійної напруги:
  - перше – регульоване,
  - друге – нерегульоване, з напругою на виході 20-24В.
2. Споживачі енергії  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .
3. Вимірювальні прилади: амперметр, вольтметр.

### 3.3 Порядок виконання роботи

1. Скласти коло зображене на рис. 3.5.

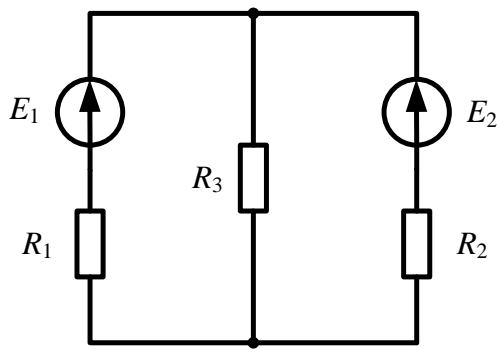


Рис.3.5

2. Перевірка справедливості принципу накладання.

2.1. Дослідити коло при дії тільки джерела  $E_1$ :

2.1.1. Замість джерела  $E_2$  ввімкнути резистор  $R_4$ , величина опору якого дорівнює величині внутрішнього опору  $R_{02}$  джерела  $E_2$  (рис. 3.6).

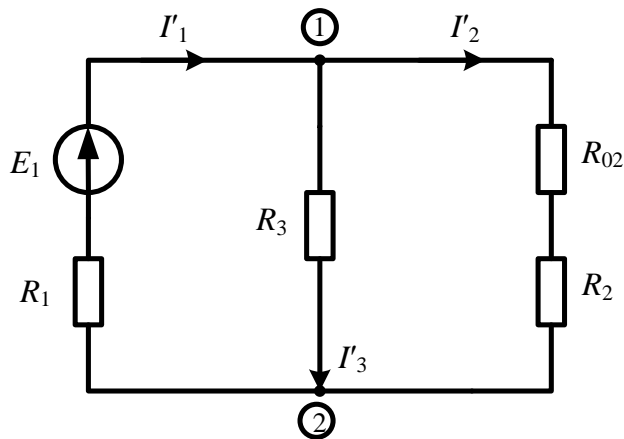


Рис. 3.6

2.1.2. Виміряти струми у кожній гілці, дотримуючись однакового підключення амперметра. Перевірити правильність вимірювань за першим законом Кірхгофа. Дані вимірювань занести у табл.3.1.

2.2. Дослідити коло при дії тільки джерела  $E_2$ :

2.2.1. Замість джерела  $E_1$  ввімкнути резистор  $R_4$ , величина опору якого дорівнює величині внутрішнього опору  $R_{01}$  джерела  $E_1$  (рис. 3.7).

Виміряти струми у кожній гілці, дотримуючись однакового підключення амперметра. Перевірити правильність вимірювань за першим законом Кірхгофа. Дані вимірювань занести у табл.3.1.

2.3. Розрахувати дійсні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  у кожній гілці, як алгебраїчну суму струмів, спричинених дією  $E_1$  і  $E_2$  окремо.

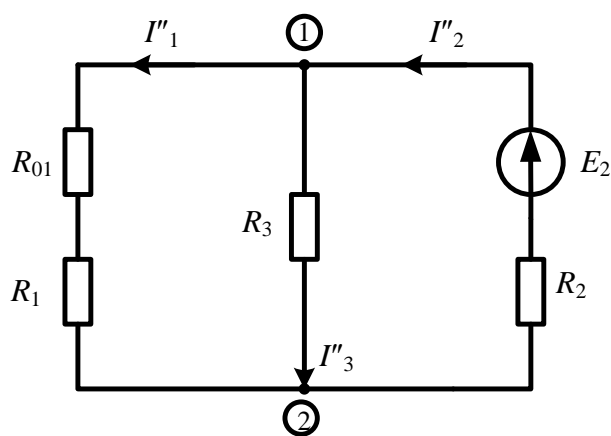


Рис. 3.7

2.4. Порівняти розраховані струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  із значеннями, виміряними в досліді з одночасною дією  $E_1$  і  $E_2$  (табл.3.1.); переконатися у справедливості принципу накладання.

Таблиця 3.1.

Режим роботи електричного кола	Результати вимірювань		
	$I_1$ , [A]	$I_2$ , [A]	$I_3$ , [A]
$E_1 \neq 0, E_2 = 0$			
$E_2 \neq 0, E_1 = 0$			
Результат обчислення			

### 3.4 Опрацювання результатів досліджень

1. Розрахувати методом накладання струми у колі, показаному на рис. 3.5, результати розрахунків порівняти з даними табл.3.1.
2. Зробити висновки по роботі.

### 3.5 Контрольні питання

1. У чому полягає принцип накладання струмів?
2. Які величини можна знаходити за принципом накладання?
3. Поясніть сутність методу накладання і яка його основна перевага?
4. Для розрахунку яких кіл можна і доцільно використовувати метод накладання?
5. Як слід представити реальні та ідеалізовані джерела енергії, що підлягають вилученню з часткової схеми?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У КОЛІ

**Мета роботи:** Перевірити справедливність співвідношень, що використовують для розрахунку еквівалентних опорів для послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів.

Здійснити еквівалентні перетворення резисторів, які утворюють сторони несиметричного «трикутника» на сполучення резисторів «зіркою». Здійснити еквівалентні перетворення сполучення резисторів симетричною «зіркою» на сполучення резисторів «трикутником».

#### 4.1 Основні теоретичні відомості

Розрахунок електричного кола у багатьох випадках можна значно полегшити, якщо застосувати еквівалентні перетворення. **Еквівалентним перетворенням** називають заміну будь-якої частини кола на іншу схемну реалізацію з відмінною структурою і параметрами елементів за умови, що така заміна не призводить до зміни струмів та напруг у тій частині кола, яка не перетворюється. Еквівалентні перетворення зменшують кількість віток або(і) вузлів схеми, а отже, і кількість рівнянь, що визначають її електричний стан. Особливу значущість набувають еквівалентні перетворення під час аналізу простих кіл, до складу яких входить лише одне джерело енергії й елементи, що з'єднані між собою послідовно, паралельно, зіркою або трикутником. Розрахунок струмів і напруг на ділянках простих кіл найчастіше виконують методом еквівалентних перетворень (згортки). На першому етапі схему заміщення кола спрощують до одного контуру з ідеальним джерелом напруги або до двоконтурної схеми з ідеальним джерелом струму, а на другому етапі розгортають спрощену схему до вихідної структури.

*Зауваження.* Вочевидь, що просте коло, як і будь-яке складне з кількома джерелами енергії, можна проаналізувати класичними методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Основними видами еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл є заміна одним еквівалентним опором послідовно або паралельно увімкнених резисторів та взаємозаміна сполучення трьох резисторів «трикутником» на з'єднання трьох резисторів «зіркою».

Резистори з'єднані **послідовно**, якщо через всі елементи проходить один і той самий струм. При послідовному з'єднанні елементів їх опори додаються арифметично:

$$R_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^n R_k. \quad (4.1)$$

Резистори з'єднані **паралельно**, якщо до елементів прикладена одна і та сама напруга. При паралельному з'єднанні елементів їх провідності додаються арифметично:

$$G_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^n G_k. \quad (4.2)$$

Якщо до пари вузлів приєднані тільки два опори, формула для розрахунку еквівалентного опору набуває вигляду:

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4.3)$$

Сполучення трьох резисторів, які утворюють сторони трикутника, називають «**трикутником**» (рис. 4.4,а). «**Зірка**» – це з'єднання трьох резисторів, яке має вигляд трипроменевої зірки (рис. 4.4,б). У вузлах ①, ②, ③ «зірка» і «трикутник» зв'язані з рештою схеми.

#### **Правило еквівалентного перетворення «трикутника» опорів на «зірку»:**

Опір променя зірки, приєданого до вузла *a*, визначається як добуток двох опорів віток трикутника, прилеглих до вузла *a*, поділений на суму опорів усіх трьох віток трикутника:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (4.4)$$

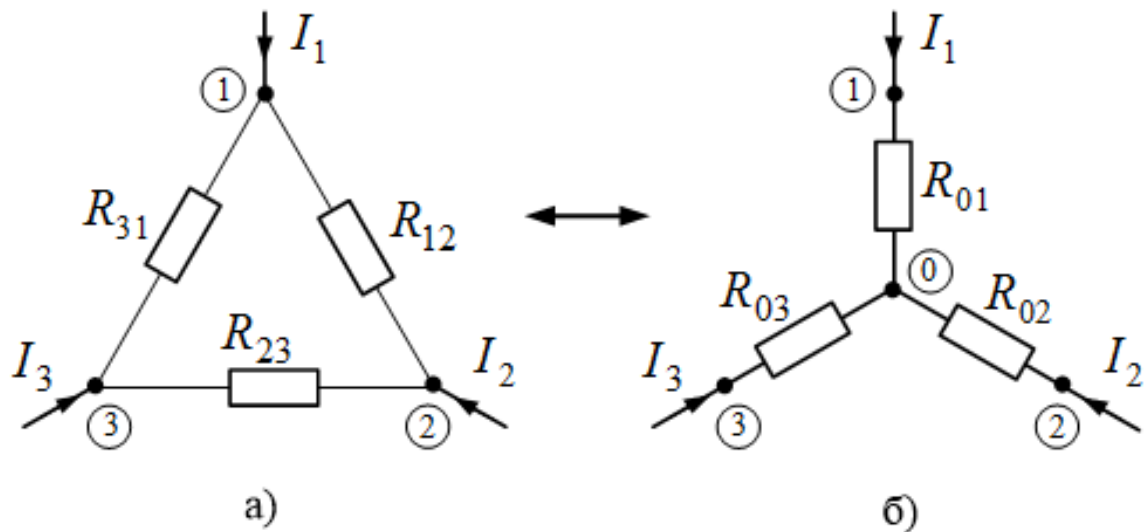


Рис. 4.4. Схема заміщення частини кола:  
сполучення трьох резисторів «трикутником» (а), «зіркою» (б)

#### Правило еквівалентного перетворення «зірки» опорів на «трикутник»:

Опір сторони трикутника між вузлами  $a$  і  $b$  дорівнює сумі опорів променів зірки, прилеглих до вузлів  $a$  і  $b$ , та їхнього добутку, поділеному на опір третього променя зірки:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}, \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}, \quad R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}. \quad (4.5)$$

Резистори з'єднані **мішано**, якщо деякі із сукупності резисторів з'єднані послідовно, деякі паралельно, а деякі, можливо, «трикутником» або «зіркою». Еквівалентний опір кола з мішаним з'єднанням резисторів відносно вхідних затискачів розраховується поетапно – схема нібито згортається до одного еквівалентного елемента. Розпочинати згортання слід з еквівалентних перетворень елементів, увімкнених якнайдалі від вхідних затискачів.

## 4.2 Порядок виконання роботи

1. Значення опорів резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ , які задає викладач, слід записати у рядки таблиці 4.1. В якості резисторів з номіналами  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  використати магазини опорів (два магазини розміщені у правій тумбі науково-дослідного стенда, третій магазин – переносний).

Таблиця 4.1

$R_{12}$	$R_{23}$	$R_{31}$

2. З'єднати три резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  послідовно (рис. 4.1,а), потім паралельно (рис. 4.1,б) та мішано (рис. 4.1,в). Виміряти еквівалентний опір кожного сполучення резисторів за допомогою мультиметра у режимі омметра і записати значення у таблицю 4.2.

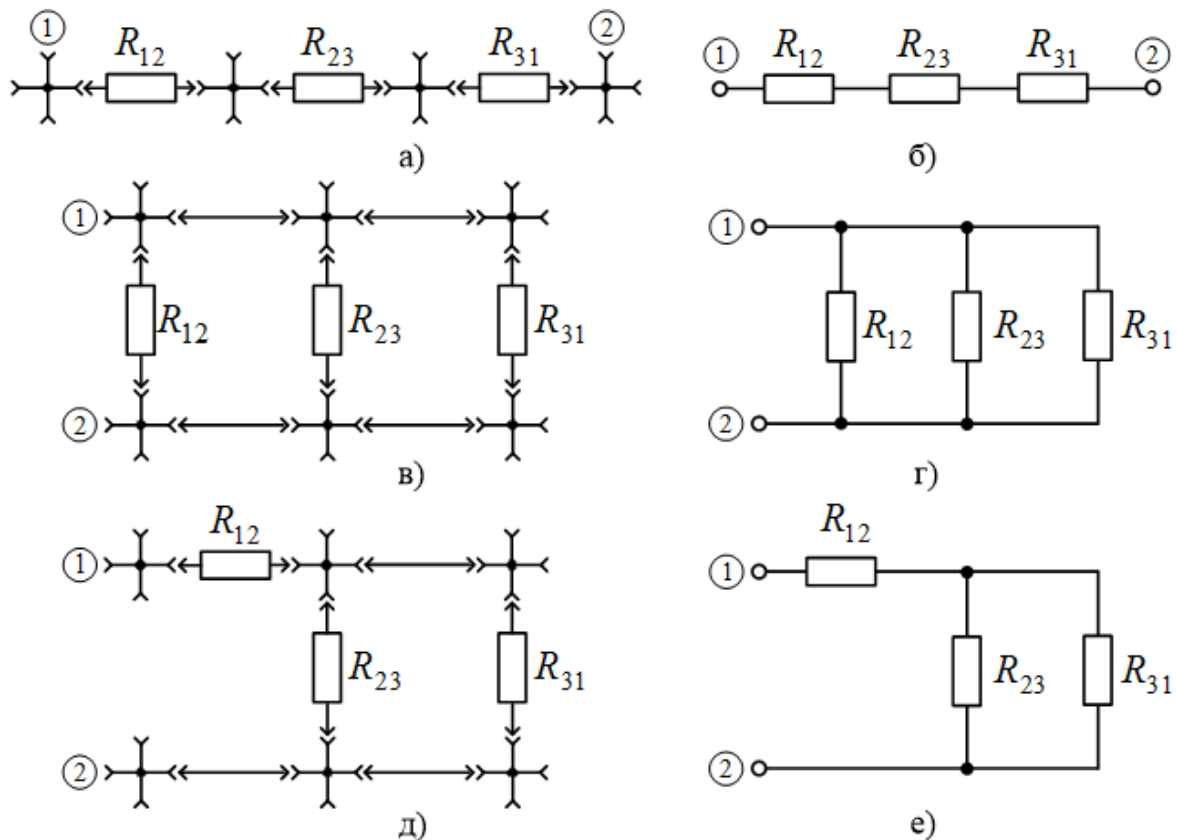


Рис. 4.1. Послідовне (а), (б), паралельне (в), (г) і мішане сполучення резисторів (д), (е)



Таблиця 4.2

Тип сполучення резисторів	Еквівалентний опір сполучення резисторів		
	показ омметра	розрахункова формула	результат обчислення
послідовно			
паралельно			
мішано			

3. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  сполучені «трикутником» (рис. 4.2,а). Значення напруги  $U_{14}$  між затискачами регульованого джерела напруги  $Дж_2$ , навантаженого на пасивне коло, задає викладач. Потрібно виміряти омметром значення опорів резисторів  $R_1$ ,  $R_2$  і записати разом з величиною  $U_{14}$  у таблицю 4.3. Довільно спрямувати струми

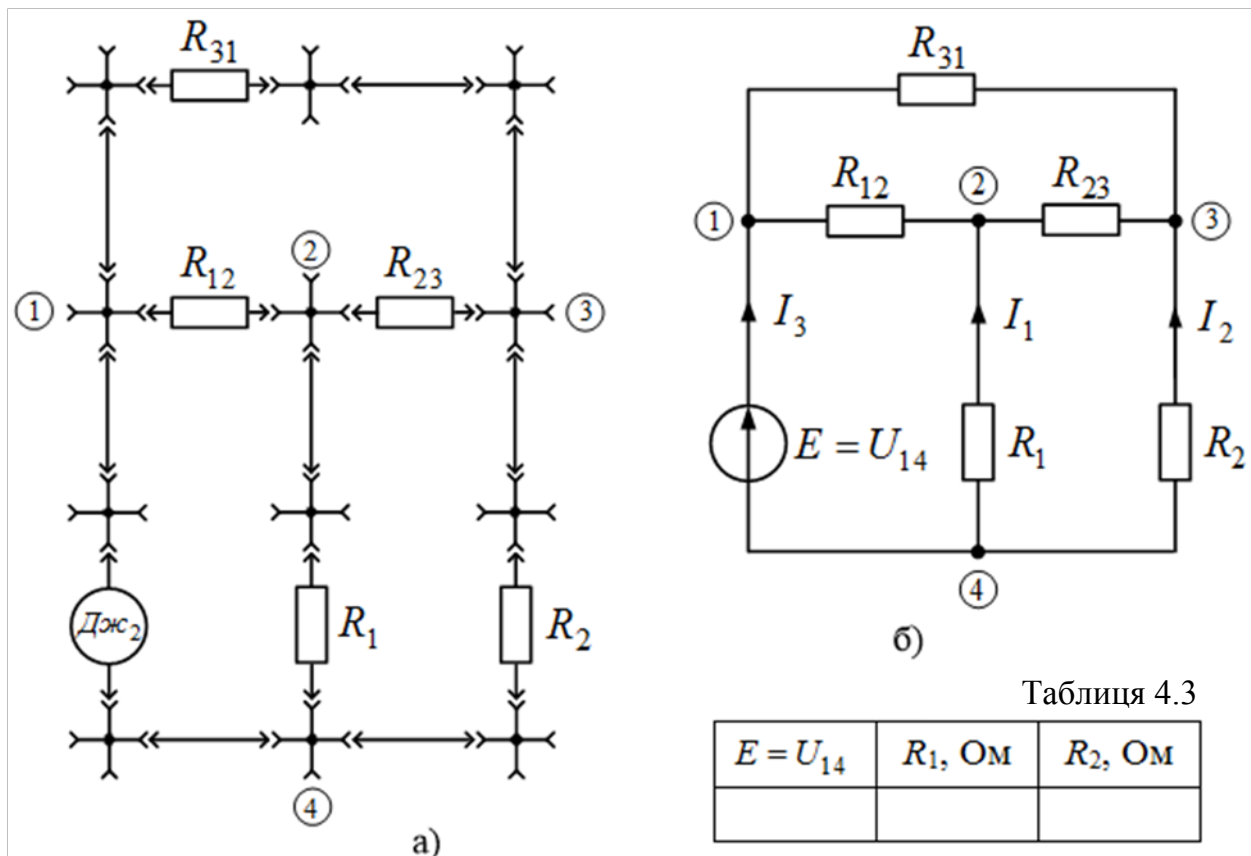


Рис. 4.2. Схема кола, в якому резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  з'єднані «трикутником»: монтажна (а), схема заміщення з довільно спрямованими струмами (б)

$I_1, I_2, I_3$  у трьох вітках, які є зовнішньою частиною електричного кола щодо сполучення резисторів  $R_{12}, R_{23}, R_{31}$  «трикутником», і позначити напрями струмів на схемі заміщення, наприклад як на рис. 4.2,б.

4. Виміряти напруги  $U_{12}, U_{23}, U_{31}$  між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні щодо «трикутника» струми  $I_1, I_2, I_3$  згідно з обраними напрямками. Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 4.4. Обов'язково указати значення опорів резисторів  $R_{12}, R_{23}, R_{31}$ .

Таблиця 4.4

Тип сполучення резисторів	$U_{12}$	$U_{23}$	$U_{31}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Трикутник: $R_{12} =$ , $R_{23} =$ , $R_{31} =$						
Зірка: $R_{01} =$ , $R_{02} =$ , $R_{03} =$						

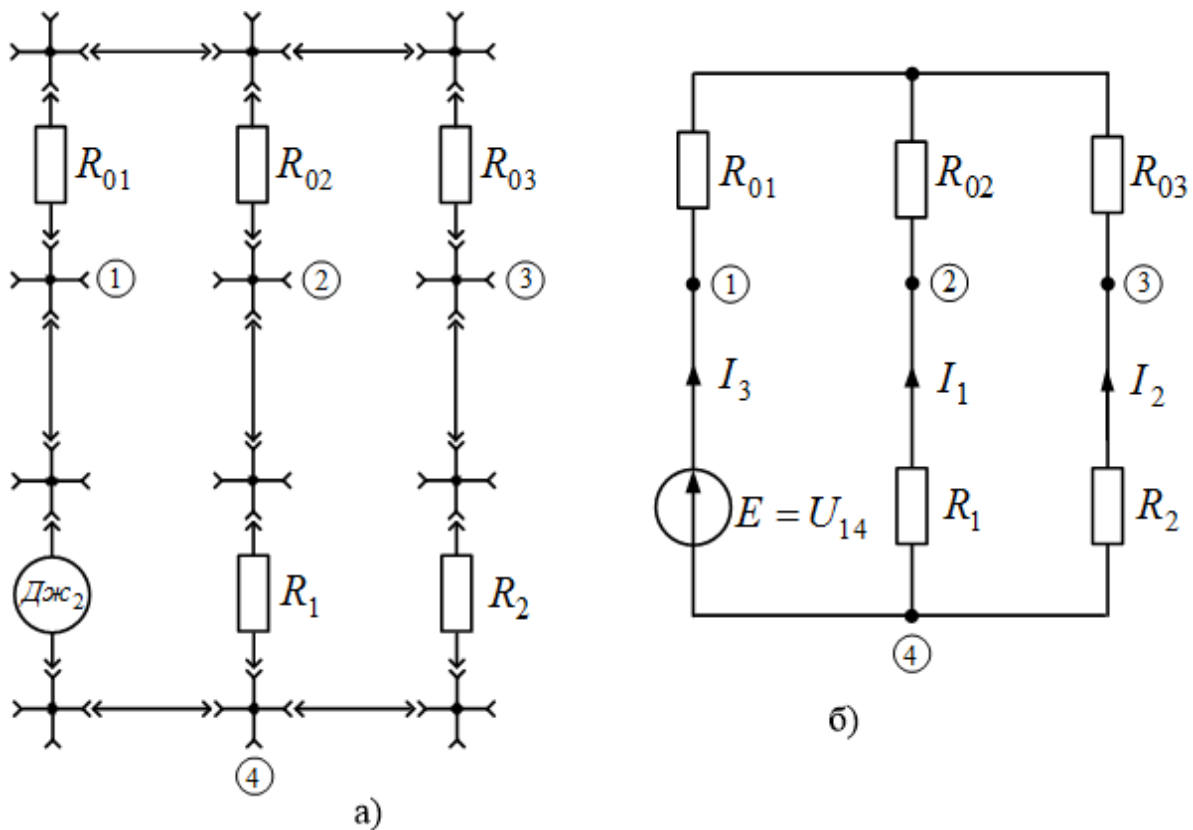


Рис. 4.3. Схема кола, в якому резистори  $R_{01}, R_{02}, R_{03}$  сполучені «зіркою»: монтажна (а), схема заміщення (б)

5. Здійснити еквівалентне перетворення сполучення резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  «трикутником» на сполучення «зіркою» резисторів  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$ , значення опорів яких потрібно розрахувати і записати у перший стовпець таблиці 4.4.

6. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$  сполучені «зіркою» (рис. 4.3). Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між вузлами ①, ②, ③ та вхідні щодо «зірки» струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у другий рядок таблиці 4.4. та порівняти з результатами вимірів у схемі на рис. 4.2. Упевнитись в тому, що здійснено еквівалентне перетворення.

7. Отримати у викладача інформацію щодо значень опорів резисторів  $R_{01}$ ,  $R_{02}$ ,  $R_{03}$ , сполучених на симетричну «зірку» (рис. 4.3), і записати ці значення у перший стовпчик таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Тип сполучення резисторів	$U_{12}$	$U_{23}$	$U_{31}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Симетрична зірка: $R_{01} =$ , $R_{02} =$ , $R_{03} =$						
Симетричний трикутник: $R_{12} =$ , $R_{23} =$ , $R_{31} =$						

8. Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між кінцями «променів зірки» ①, ②, ③ та вхідні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 4.5.

9. Здійснити еквівалентне перетворення симетричної «зірки» на симетричний «трикутник» (рис. 4.2) із резисторів з опорами  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$ , значення яких треба обчислити та записати у перший стовпець таблиці 4.5.

10. Скласти електричне коло, в якому три резистори  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  сполучені симетричним «трикутником» (рис. 4.2). Виміряти напруги  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$  між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Результати вимірювань записати у другий рядок таблиці 4.5 та упевнитись, що здійснено еквівалентне перетворення.

### 4.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Розрахувати опори послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  (рис. 4.1) з номіналами, заданими викладачем (таблиця 4.1). Розрахункові формули та результати обчислень записати у таблицю 4.2. Порівняти отримані результати з виміряними у п.1 значеннями.

2. Розрахувати сили струмів  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  у схемі, де три резистори з різними номіналами  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  сполучені «трикутником» (рис. 4.2,б), методами контурних струмів та вузлових потенціалів. Зважаючи на малий опір регульованого джерела напруги  $Дж_2$ , вважати, що електричне коло живиться від ідеального джерела напруги з  $E = U_{14}$ .

3. Порівняти результати розрахунків з результатами лабораторних досліджень (таблиця 4.4).

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

### 4.4 Контрольні питання

1. Як перетворити активну «зірку» (рис 4.5,а) на активний «трикутник» (рис 4.5,б)?

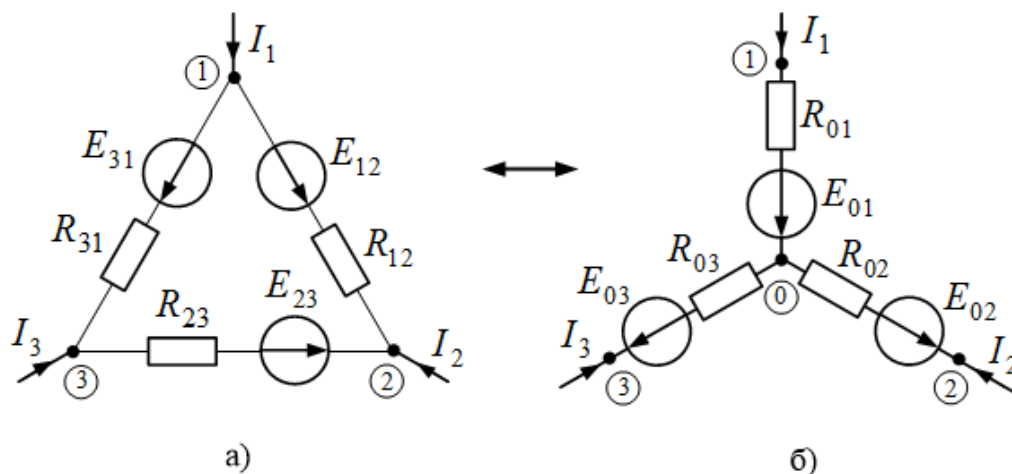


Рис. 4.5. Схема заміщення частини кола: сполучення трьох активних віток «зіркою» (а), сполучення трьох активних віток «трикутником» (б)

2. Як перетворити активний «трикутник» (рис 4.5,б) на активну «зірку» (рис 4.5,а)?
3. Яку дію називають еквівалентним перетворенням електричного кола? Які види еквівалентних перетворень Ви знаєте?
4. Як замінити два послідовно увімкнених опори одним еквівалентним? Два паралельно увімкнених?
5. Яке сполучення опорів електричного кола називається «зіркою»? «трикутником»?
6. Як замінити з'єднання опорів «зіркою» на еквівалентний «трикутник»? «трикутник» на еквівалентну «зірку»?
7. Яким чином можна упевнитись в еквівалентності перетворення частини електричного кола?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ РЕЗИСТОРА, ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ ТА КОНДЕНСАТОРА

**Мета роботи:** експериментально визначити електричні параметри кола з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів. Навчитися аналізувати електричні процеси в колі за допомогою векторних діаграм.

#### 5.1 Основні теоретичні положення

Електричний стан кола з послідовним з'єднанням активного опору  $R$ , індуктивності  $L$  та ємності  $C$  (рис. 5.1) описується другим законом Кірхгофа, який записується у комплексній формі наступним чином

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C ,$$

де  $\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}$ ,  $\dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I}$ ,  $\dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}$  – комплексні напруги на ділянках кола;  $R$  – активний опір,  $X_L = \omega L$  та  $X_C = 1/\omega C$  – реактивні індуктивний та ємнісний опори відповідно;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $f$  – циклічна частота напруги живлення.

За рівнянням для комплексної напруги на вході кола можна побудувати векторну діаграму струму та напруг електричного кола. Вектор напруги  $\dot{U}_R$  на активному опорі збігається з напрямом струму  $\dot{I}$ , вектор напруги на індуктивності  $\dot{U}_L$  випереджає струм на  $90^\circ$ , а на ємності  $\dot{U}_C$  – відстає на  $90^\circ$ . Побудовану таким чином діаграму подано на рис. 5.2. Враховуючи складові  $\dot{U}_R$ ,  $\dot{U}_L$  та  $\dot{U}_C$ , рівняння, що описується другим законом Кірхгофа, перетворюється до вигляду

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

або до виду рівняння, записаного в комплексній формі за законом Ома для всього кола

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}},$$

де  $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$  - комплексний опір кола з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів.

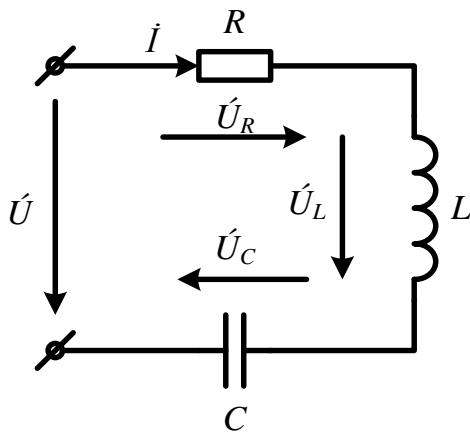


Рис. 5.1

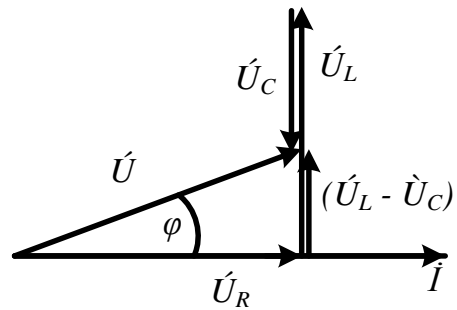


Рис. 5.2

Модуль комплексного опору (повний опір) кола синусоїдного струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Із виразу випливає, що повний опір кола синусоїдного струму залежить не тільки від параметрів елементів кола, а й від частоти прикладеної напруги.

Взаємозв'язок між діючими значеннями струму, напруги та повним опором кола визначається співвідношеннями  $U = IZ$  або  $I = U/Z$ .

Із трикутника напруг, поданого на векторній діаграмі (рис. 5.2), можна отримати трикутник опорів (рис. 5.3), якщо сторони трикутника напруг поділити на струм

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{U_R}{I}, \quad X = X_L - X_C = \frac{U_L - U_C}{I}.$$

Співвідношення між опорами (сторонами трикутника наступні):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad R = Z \cos \varphi, \quad X = Z \sin \varphi.$$

З трикутника опорів також випливає, що  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ ,  $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$ .

Отримані співвідношення показують, що кут зсуву фаз  $\varphi$  між струмом  $\dot{I}$  та вхідною напругою  $\dot{U}$  залежить від характеру елементів, які складають коло синусоїдного струму.

Помноживши сторони трикутника опорів на квадрат струму  $I^2$ , тримаємо трикутник потужностей (рис. 5.4), з якого визначаємо співвідношення між повною  $S$ , активною  $P$  та реактивною  $Q$  потужностями

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi.$$

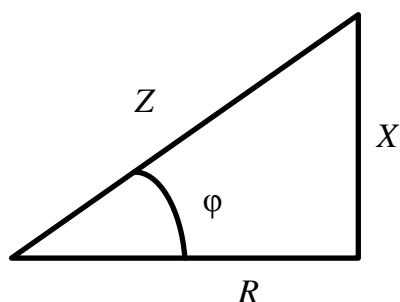


Рис. 5.3

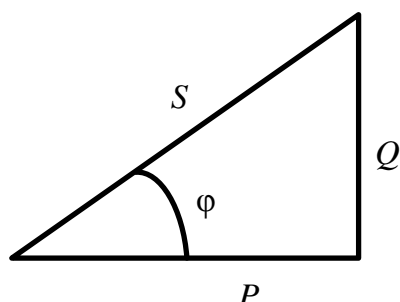


Рис. 5.4

Реактивна потужність визначається як різниця індуктивної  $Q_L$  та ємнісної  $Q_C$  потужностей  $Q = Q_L - Q_C$ .

Вираз для повної потужності в комплексному вигляді записують так

$$\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C) \quad \text{та} \quad \tilde{S} = S(\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

## 5.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами для вимірювання і обладнанням панелей №3, №4 стенда та вимірювальним комплектом К505.



2. Скласти відповідно до рис. 5.5 схему послідовного з'єднання двох активних опорів  $R_1$  і  $R_2$ .

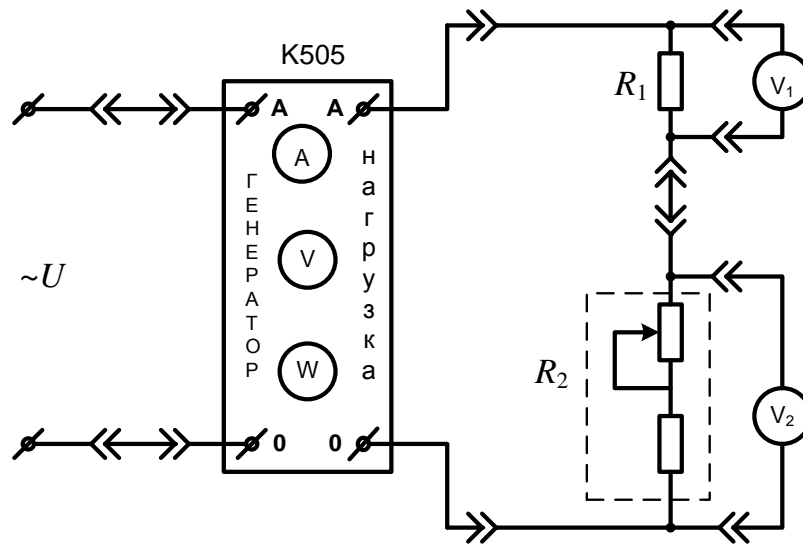


Рис. 5.5

3. Подати на електричне коло напругу, величину якої визначає керівник занять та виміряти величини, наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Дані вимірювань					Результати обчислень			
$I$	$U$	$P$	$U_{R1}$	$U_{R2}$	$R$	$R_1$	$R_2$	$\cos \varphi$
А	В	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	

4. Скласти схему відповідно до рис. 5.6 з послідовним з'єднанням опору  $R_1$  та котушки індуктивності. Для цього необхідно замінити активний опір  $R_2$  на котушку з активним опором  $R_k$  та індуктивністю  $L_k$  розташовану на панелі №4. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 5.2. Дослід провести в два етапи.

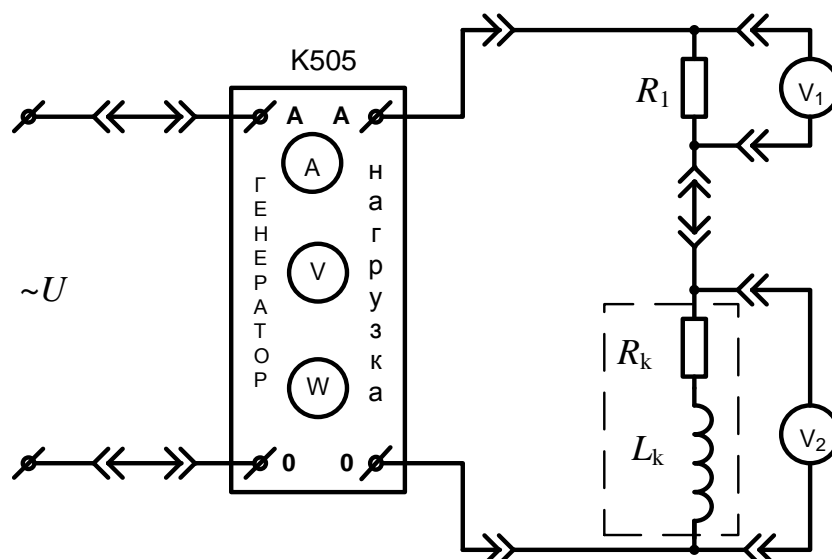


Рис. 5.6

Спочатку для визначення параметрів котушки, спростити схему. Для цього слід замкнути опір  $R_1$  перемичкою та виміряти струм  $I_k$ , напругу  $U_k$  та потужність  $P_k$  для подальшого розрахунку параметрів котушки. Потім відновити опір  $R_1$  і провести вимірювання параметрів для всього кола.

Таблиця 5.2

Дані вимірювань					Результати обчислень									
					Котушка					Усе коло				
$I$	$U$	$P$	$U_1$	$U_2$	$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$\cos \phi_k$	$L$	$Z$	$R$	$U_a$	$U_p$	$\cos \phi$
А	В	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом		Гн	Ом	Ом	В	В	

5. Скласти схему відповідно до рис. 5.7 з послідовним з'єднанням опору  $R_1$  та конденсатору. Для цього необхідно замінити котушку індуктивності блоком конденсаторів  $C_1 \dots C_{15}$ , розташованого на панелі №4. Величину ємності встановити за вказівкою керівника. Виміряти величини, наведені в табл. 5.3.

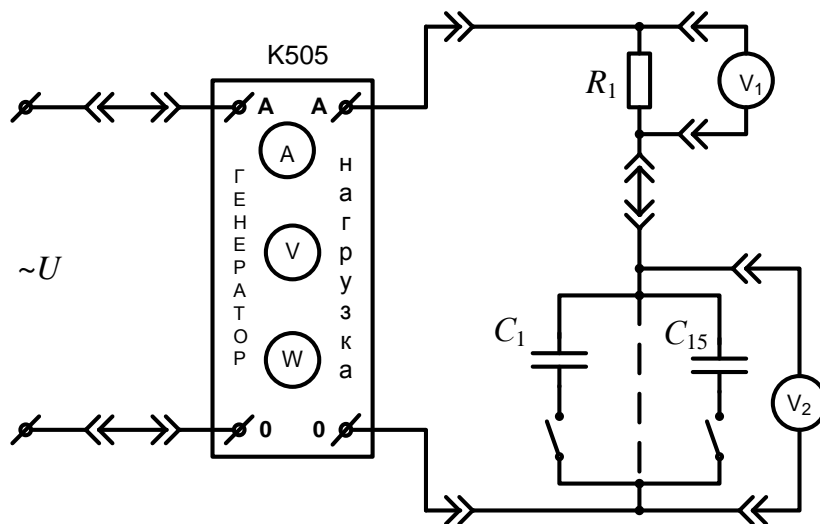


Рис. 5.7

Таблица 5.3

Дані вимірювань					Результати обчислень						
					Конденсатор		Усе коло				
$I$	$U$	$P$	$U_1$	$U_2$	$X_C$	$C$	$Z$	$R$	$U_a$	$U_p$	$\cos \varphi$
A	B	Вт	B	B	Ом	мкФ	Ом	Ом	B	B	

### 5.3 Опрацювання результатів досліджень

1. За даними вимірювань для активного кола розрахувати значення, вказані в таблиці 5.1.

Побудувати в масштабі за даними вимірювань векторну діаграму струмів та напруг кола.

2. За даними вимірювань аналітично розрахувати значення вказані в табл. 5.2; 5.3 за формулами:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad \sin \varphi_k = \frac{U_p}{U_2} \quad U_a = U \cdot \cos \varphi, \quad U_p = \sqrt{U^2 - U_a^2}, \quad U_{ka} = U_a - U_1,$$

$$\cos \varphi_k = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_k}, \quad Z_k = \frac{U_2}{I}, \quad R_k = \frac{U_{ka}}{I}, \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k, \quad Z = \frac{U}{I}, \quad R = Z \cos \varphi,$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_k - X_C}{R}, \quad L = \frac{X_k}{2\pi f}, \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C}, \quad f = 50 \text{ Гц}$$

3. Побудувати в масштабі за даними табл. 5.2 і 5.3 векторні діаграми методом засічок. Вказати масштаби для напруги і струму.

4. Записати рівняння миттєвого значення струму, вхідної напруги та напруг на опорах  $R_1$  та  $R_2$ , вважати величину початкової фази джерела напруги рівною нулю ( $\psi_u = 0$ ).

5. За даними в табл. 5.1, 5.2, 5.3 написати в комплексній формі вирази опорів, котушки, резистора та конденсатора. Зробити висновки про виконану роботу.

## 5.4 Контрольні питання

1. Як зміниться струм у  $R$ - $L$  колі та кут зсуву між вхідною напругою і струмом, якщо опір резистора  $R$  вдвічі зменшиться, а індуктивність  $L$  котушки вдвічі збільшиться за незмінної частоти?

2. Як зміниться струм у  $R$ - $C$  колі та кут зсуву фаз між вхідною напругою і струмом, якщо в опір резистора  $R$  вдвічі збільшиться, а ємність  $C$  конденсатора вдвічі зменшиться за незмінної частоти?

3. Яким має бути у  $R$ - $L$ - $C$  колі співвідношення між опорами  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ , щоб кут зсуву фаз  $\varphi$  між напругою і струмом на вході дорівнював  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ?

4. Як зміниться струм у  $R$ - $L$ - $C$  колі та кут зсуву фаз  $\varphi$  між напругою і струмом на вході, якщо індуктивність  $L$  котушки і ємність  $C$  конденсатора одночасно збільшити вдвоє? Яким у  $R$ - $L$ - $C$  колі має бути співвідношення між  $X_L$  і  $X_C$ , щоб при збільшенні частоти у 3 рази струм залишився таким самим?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСУ НАПРУГ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** Дослідити явище резонансу напруг у колі з послідовним з'єднанням активних та реактивних елементів. Навчитися аналізувати електричні процеси в колі за допомогою векторних діаграм.

#### 6.1 Основні теоретичні положення

В колі з послідовним з'єднанням індуктивного та ємнісного елементів можливий особливий стан, коли кут зсуву фаз між струмом та напругою на вході кола дорівнює нулю. Цей стан називається резонансом напруг і виникає коли індуктивний опір кола дорівнює ємнісному:

$$X_L = X_C \quad \text{або} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Із наведених виразів випливає, що резонанс можна отримати змінюючи індуктивність, ємність або частоту прикладеної напруги, а також одночасно змінюючи параметри кола. Якщо змінювати ємність конденсатора, то змінюється ємнісний опір та повний опір кола. Відповідно, змінюються струм, коефіцієнт потужності, напруги на котушці індуктивності та конденсаторі, повна, активна та реактивна потужності кола. Залежності струму  $I$ , коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  та повного опору  $Z$  кола синусоїдного струму (рис. 6.1) від

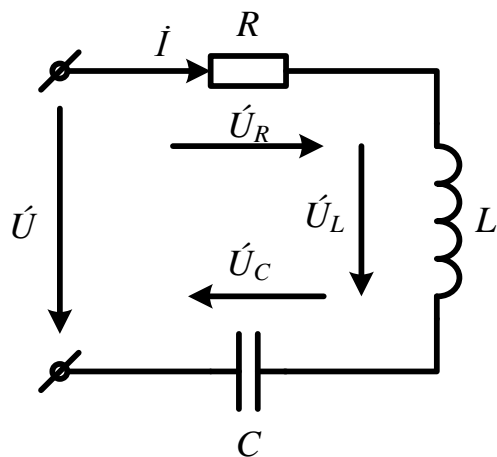


Рис. 6.1

ємнісного опору  $X_C$  (резонансні криві) подано на рис. 6.2. Векторну діаграму струму та напруг цього кола подано на рис. 6.3.

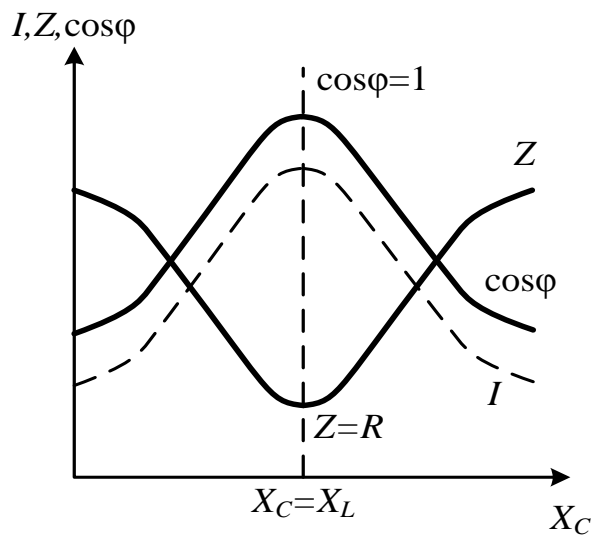


Рис. 6.2

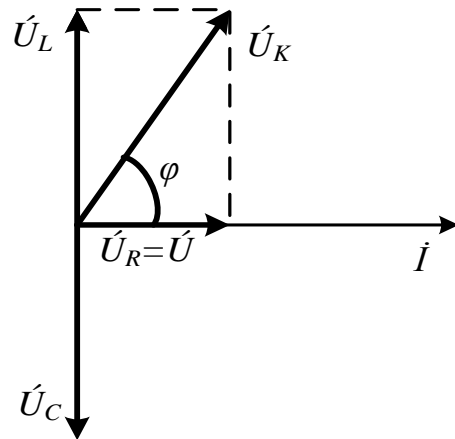


Рис. 6.3

Як можна побачити з векторної діаграми, реактивна складова напруги  $U_L$  на котушці під час резонансу дорівнює напрузі на конденсаторі  $U_C$ . Оскільки у котушки крім реактивного опору  $X_L$  є ще й активний  $R$ , то напруга на котушці  $U_K$  більше напруги на конденсаторі. Тому точка резонансу визначається за максимумом струму в колі.

Проаналізувавши наведені вирази, а також рис. 6.2 та 6.3, можна зробити наступні висновки:

1. Під час резонансу повний опір кола має мінімальне значення та дорівнює активному  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$ .

2. З п.1 випливає, що за незмінної напруги живлення, струм в колі приймає максимальне значення.

3. В стані резонансу коефіцієнт потужності  $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{R} = 1$ , тобто приймає максимальне значення, якому відповідає  $\varphi = 0$ . Вектори струму  $\dot{I}$  та

напруги живлення  $\dot{U}$  мають однаковий напрям, оскільки мають однакові початкові фази  $\psi_u = \psi_i$ .

4. Активна потужність під час резонансу  $P = I^2 R$  максимальна і дорівнює повній потужності  $S$ ; реактивна потужність  $Q$  дорівнює нулю.

5. Напруги на індуктивності та ємності однакові  $U_L = U_C$  і можуть бути більшими, ніж напруга живлення; напруга на активному опорі дорівнює вхідній  $U_R = U$ .

Резонанс напруг в промисловому електротехнічному устаткуванні є небажаним та небезпечним, оскільки може привести до аварії внаслідок перегріву окремих елементів кола або до пробію ізоляції обмоток трансформаторів, електричних машин, ізоляції кабелів та конденсаторів внаслідок перенапруги на окремих ділянках кола.

В той же час резонанс напруг в електричних колах змінного струму широко застосовується в електроніці та радіотехніці в різних приладах та пристроях, принцип дії яких побудований на використанні явища резонансу.

## 6.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами для вимірювання і обладнанням панелей №3, №4 стенда та вимірювальним комплектом K505.

2. Скласти схему, відповідно до рис. 6.4, з послідовним з'єднанням котушки і блока конденсаторів, які розташовані на панелі №4.

3. Враховуючи можливість виникнення великих напруг, подати на вхід кола напругу не більше 20 В.

4. Змінюючи величину ємності блока конденсаторів в межах від  $C = 0$  до  $C_m$  (значення  $C_m$  визначає керівник занять), занести в таблицю 6.1 значення напруг  $U$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  та струму  $I$ .

Окремо відмітити резонанс напруги за  $C = C_0$ , який фіксується за найбільшим струмом у нерозгалуженій частині кола.

Таблиця 6.1

Номер досліду	Дані вимірювань						Результати обчислень		
	$C$	$I$	$U$	$U_L$	$U_C$	$P$	$\cos \varphi$	$X_C$	$\varphi$
	мкФ	А	В	В	В	Вт	від/од	Ом	град
1									
...									
...									
9									

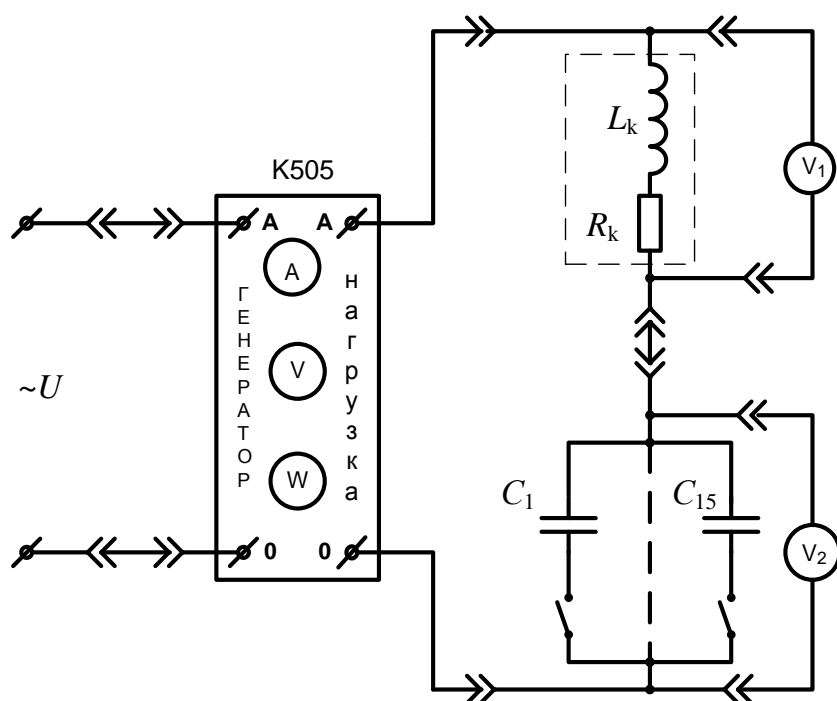


Рис. 6.4

### 6.3 Опрацювання результатів досліджень

1. За даними вимірювань розрахувати значення вказані в табл. 6.1 за формулами:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad \cos \varphi_k = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_k}, \quad Z_k = \frac{U_2}{I}, \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k,$$



$$\varphi = \arctg \frac{X_k - X_C}{R}, \quad L = \frac{X_k}{2\pi f}, \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C}.$$

3. За даними вимірювань табл. 6.1 побудувати векторні діаграми для випадків  $C < C_0$ ,  $C = C_0$ ,  $C > C_0$ .

4. Побудувати в масштабі на одному рисунку графіки залежностей:  $I = f(C)$ ,  $\cos \varphi = f(C)$ ,  $\varphi = f(C)$ . Для графіка  $\varphi(C)$  передбачити зміну знака кута  $\varphi$ .

5. Записати рівняння миттєвого значення струму, вхідної напруги та напруг на котушці та конденсаторі, вважати величину початкової фази джерела напруги рівною нулю ( $\psi_u = 0$ ).

6. Зробити висновки про виконану роботу.

#### 6.4 Контрольні питання

1. У колі з послідовним з'єднанням котушки, конденсатора і резистора за параметрів елементів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  на певній частоті  $\omega$  має місце резонанс напруг. Який параметр і як саме потрібно змінити, щоб отримати резонанс на частоті  $2\omega$ ?

2. Як зміниться хвильовий опір кола, якщо одночасно індуктивність котушки збільшити у два рази, а ємність конденсатора зменшити у два рази?

3. За якого співвідношення параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  під час резонансу виникають перенапруги на конденсаторі та котушці? Якою величиною характеризують перенапруги? Чим вони небезпечні?

4. Як можна обмежити перенапруги на конденсаторі та котушці під час резонансу?

5. Чим енергетичні процеси у  $R$ - $L$ - $C$  контурі в режимі резонансу відрізняються від процесів у звичайному режимі?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ РЕЗИСТОРА, ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ ТА КОНДЕНСАТОРА

**Мета роботи:** експериментально визначити параметри кола з паралельним з'єднанням активних та реактивних елементів; навчитися будувати векторні діаграми за даними.

#### 7.1 Основні теоретичні положення

Серед усього розмаїття електричних кіл змінного струму є такі, в яких споживачі з'єднані паралельно і знаходяться під дією однієї напруги. Струм в кожному з них залежить від значення опору відповідного споживача та значення напруги живлення. Споживачі в колах синусоїдного струму мають активно-реактивний характер і кожен з них може бути представлено послідовним з'єднанням опорів  $R$ ,  $X_L$  та  $X_C$ .

Прикладом електричного кола синусоїдного струму з паралельним з'єднанням споживачів може служити коло, представлене на рис. 7.1. Якщо розглядати окремі паралельні вітки цього кола, як незалежні електричні кола, то для кожної з них можна побудувати векторну діаграму, прийнявши, що  $X_{L1} > X_{C1}$  та  $X_{L2} < X_{C2}$  (рис. 7.2). Якщо споживач має активно-індуктивний характер, то вектор струму  $\dot{I}_1$  відстає від напруги  $\dot{U}$  на кут  $\varphi_1$ , якщо активно-ємнісний, то струм  $\dot{I}_2$  випереджає напругу на кут  $\varphi_2$ .

Для електричного кола з паралельним з'єднанням елементів, у відповідності з першим законом Кірхгофа, струм  $\dot{I}$  в нерозгалуженій частині кола дорівнює векторній сумі струмів паралельних віток

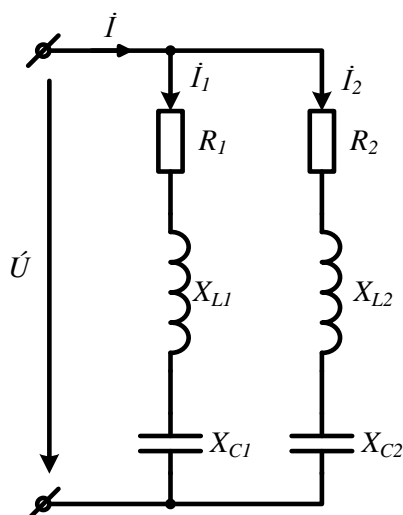


Рис. 7.1

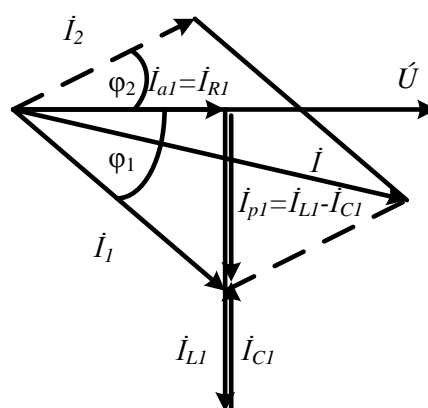


Рис. 7.2

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

В найпростіших електричних колах змінного струму з одним джерелом живлення струми в паралельних вітках визначаються за законом Ома для відповідних ділянок кола:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \dot{U} \cdot \underline{Y}_1, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \dot{U} \cdot \underline{Y}_2,$$

де  $\underline{Z}_1 = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})$ ,  $\underline{Z}_2 = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2})$  – комплексні опори віток, модулі яких відповідно дорівнюють

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} \quad \text{та} \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2};$$

$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1$ ,  $\underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2$  – комплексні провідності, які зворотно пропорційні комплексним опорам. З урахуванням вищенаведеного для кола на рис. 7.1 вираз для струму  $\dot{I}$  набуває вигляду

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} + \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \dot{U} \cdot \underline{Y}_1 + \dot{U} \cdot \underline{Y}_2 = \dot{U} \cdot (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) = \dot{U} \cdot \underline{Y},$$

де  $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2$  – комплексна провідність кола, яка у випадку паралельного з'єднання елементів дорівнює сумі відповідних комплексних провідностей паралельних віток.

Для першої вітки кола з активно-індуктивним характером коли  $X_{L1} > X_{C1}$ , комплексна провідність може бути представлена у вигляді:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})} = \frac{R_1 - j(X_{L1} - X_{C1})}{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} = \frac{R_1}{Z_1^2} - j \frac{X_{L1} - X_{C1}}{Z_1^2} = G_1 - jB_1$$

Аналогічно можна знайти комплексну провідність другої вітки, врахувавши її активно-ємнісний характер ( $X_{L2} < X_{C2}$ ):

$$\underline{Y}_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} - j \frac{X_{L2} - X_{C2}}{Z_2^2} = G_2 + jB_2.$$

Тоді комплексна провідність всього кола дорівнює

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = (G_1 + G_2) - j(B_1 - B_2) = G - jB.$$

Модуль повної провідності визначається за формулою:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2}.$$

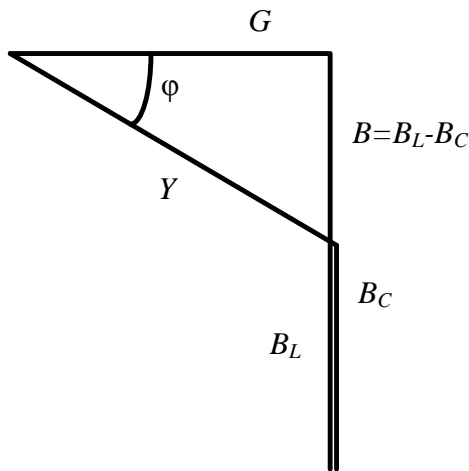


Рис. 7.3

Якщо кожний вектор струму на векторній діаграмі рис. 7.2 поділити на вектор напруги  $\dot{U}$ , отримаємо подібний трикутник провідностей для даного кола. Як приклад на рис. 7.3. подано трикутник провідностей для першої вітки кола рис. 7.1. З трикутника провідностей випливає, що

$$\cos \varphi_1 = \frac{G_1}{Y_1}, \quad \sin \varphi_1 = \frac{B_1}{Y_1} = \frac{B_{L1} - B_{C1}}{Y_1}.$$

Повна, активна та реактивна потужності визначаються через відповідні провідності

$$P_1 = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = U^2 \cdot G_1, \quad Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = U^2 \cdot B_1, \quad S_1 = U \cdot I_1 = U^2 \cdot Y_1.$$

## 7.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами для вимірювання і обладнанням панелей №3, №4 стенда та вимірювальним комплектом K505.
2. Скласти коло з паралельним з'єднанням двох активних опорів  $R_1$  і  $R_2$  відповідно до рис. 7.4, де  $A_1$  і  $A_2$  – амперметри, що знаходяться на панелі №3.
3. Встановити величину напруги на вході за вказівкою керівника занять і визначити величини наведені в табл.7.1

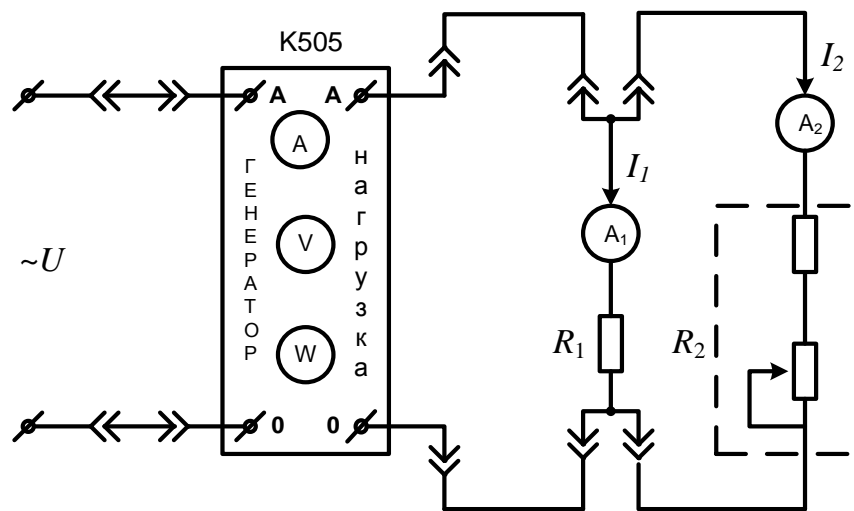


Рис. 7.4

Таблиця 7.1

Дані вимірювань					Результати обчислень		
$I$	$U$	$P$	$I_1$	$I_2$	$G_1$	$G_2$	$Y$
А	В	Вт	А	А	См	См	См

4. Скласти коло з паралельним з'єднанням активного опору  $R_1$  та котушки індуктивності відповідно до рис. 7.5. Для цього необхідно замінити активний опір  $R_2$  на котушку з активним опором  $R_k$  та індуктивністю  $L_k$  розташовану на панелі №4. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 7.2.

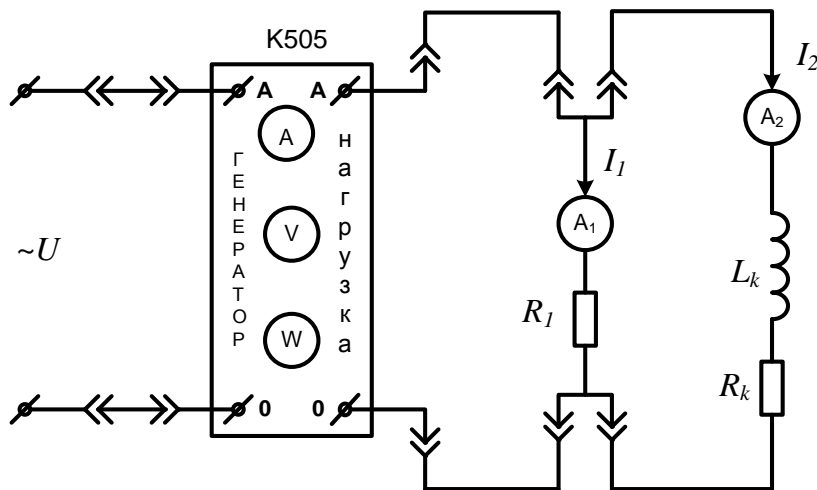


Рис. 7.5

Таблица 7.2

Дані вимірювань					Результати обчислень									
					котушка				усе коло					
$I$	$U$	$P$	$I_1$	$I_2$	$Y_K$	$G_k$	$B_K$	$\cos \varphi_K$	$I$	$G$	$B$	$\cos \varphi$	$I_a$	$I_p$
А	В	Вт	А	А	См	См	См		См	См	См		А	А

5. Скласти коло з паралельним з'єднанням опору  $R_1$  та батареї конденсаторів відповідно до рис. 7.6. Для цього необхідно замінити котушку індуктивності блоком конденсаторів  $C1...C15$ , розташованого на панелі №4. Величину ємності встановити за вказівкою керівника. Виміряти величини, наведені в табл. 7.3.

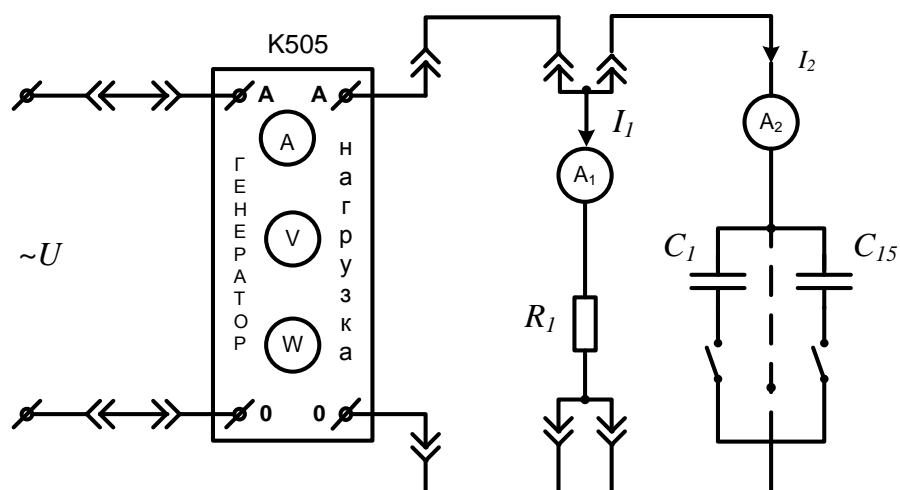


Рис. 7.6

Таблиця 7.3

Дані вимірювань						Результати обчислень						
						Конденсатор	Усе коло					
$I$	$U$	$P$	$I_1$	$I_2$	$C$	$B_C$	$I$	$G$	$B$	$\cos \varphi$	$I_a$	$I_p$
А	В	Вт	А	А	мкФ	См	См	См	См		А	А

### 7.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Визначити величини, наведені в табл.7.1, користуючись такими

формулами:  $G_1 = \frac{I_1}{U}$ ;  $G_2 = \frac{I_2}{U}$ ;  $G = \frac{I}{U}$ ;

побудувати векторну діаграму струмів.

2. Визначити величини наведені в табл. 7.2.

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad I_a = I \cdot \cos \varphi; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}; \quad I_{ka} = I_a - I_1$$

$$\sin \varphi_k = \frac{I_{kp}}{I_2}; \quad \cos \varphi_k = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_k}; \quad Y_k = \frac{I_2}{U}; \quad G_k = Y_k \cdot \cos \varphi_k;$$

$$B_k = \sqrt{Y_k^2 - G_k^2}; \quad Y = \frac{I}{U}; \quad G = Y \cdot \cos \varphi; \quad B = Y \cdot \sin \varphi; \quad \varphi = \arctg \frac{B_k - B_C}{G},$$

де  $Y_k$ ,  $G_k$ ,  $B_k$ ,  $\varphi_k$  – повна провідність, активна складова і реактивна складова провідності та кут зсуву фаз на котушці.

Побудувати векторну діаграму методом засічок. Вказати масштаби для напруги і струму. Порівняти теоретичні й практичні результати розрахунку  $\varphi_k$ .

3. Визначити величини наведені у табл. 7.3, використовуючи формули:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad I_a = I \cdot \cos \varphi; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2};$$

$$Y = \frac{I}{U}; \quad G = Y \cdot \cos \varphi; \quad B_C = Y \cdot \sin \varphi.$$

Побудувати векторну діаграму струмів у колі.

4. Написати в комплексній формі за даними табл. 7.2; 7.3 вирази провідностей котушки, активного опору і конденсатора. Зробити короткі висновки про виконану роботу.

## 7.4 Контрольні питання

1. Як зміниться вхідний струм і кут зсуву фаз між напругою і струмом на вході кола з паралельними з'єднаннями, якщо частота джерела живлення збільшиться втричі?

2. Як зміняться струми у вітках кола з паралельним з'єднанням  $R$  і  $C$  елементів, якщо ємність конденсатора збільшиться у два рази, а напруга залишиться такою самою?

3. Як зміниться вхідний струм і кут зсуву фаз між напругою і струмом на вході кола з паралельним з'єднанням  $R$ ,  $L$ ,  $C$  елементів, якщо відключити котушку; відключити резистор?



4. Як зміняться струми у вітках кола з паралельним з'єднанням  $R$ ,  $L$ ,  $C$  елементів, якщо замість синусоїдної напруги на вхід подати постійну напругу?

5. При якому співвідношенні параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  напруга на вході кола випереджає струм на кут  $\varphi = +45^\circ$ ; відстає від струму на кут  $\varphi = 90^\circ$ ?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСУ СТРУМІВ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** дослідити явище резонансу струмів; навчитися за векторні діаграми допомогою аналізувати електричні процеси в колі.

#### 8.1 Основні відомості та рекомендації

В електричних колах синусоїдного струму з паралельним з'єднанням реактивних елементів може виникати резонанс струмів. Це можливо у випадку, коли деякі вітки мають індуктивну складову опору, а деякі – ємнісну. Резонанс струмів – це особливий стан кола синусоїдного струму з паралельним з'єднанням елементів, що виникає коли реактивна індуктивна провідність кола дорівнює реактивній ємнісній провідності цього кола, тобто за умови, що  $B_L = B_C$ .

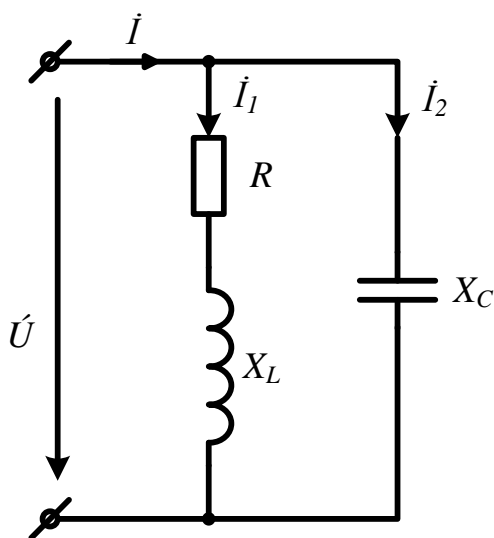


Рис. 8.1

Найпростішим електричним колом, в якому виникає резонанс струмів є коло з паралельним з'єднанням котушки індуктивності та конденсатора (рис. 8.1).

Повна провідність цього кола дорівнює

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}.$$

Умови резонансу струмів  $B_L = B_C$

можна записати через відповідні параметри кола. Реактивна провідність

котушки, що має активний опір  $R$ , визначається таким чином

$$B_L = \frac{X_L}{Z^2} = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} = \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2},$$

а провідність конденсатора таким

$$B_C = \frac{X_C}{Z^2} = \frac{1}{X_C} = \omega C.$$

Тоді умову резонансу можна записати так

$$\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = \omega C.$$

З останнього виразу випливає, що резонанс струмів можна отримати, змінюючи один з параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  та  $\omega$ , за умови, що інші є незмінними.

Найпростіші резонансні кола як коливальні контури (рис. 8.1) широко застосовуються в радіоелектроніці, в яких резонанс досягається за певного значення частоти вхідного сигналу.

В лабораторних умовах резонанс струмів досягається шляхом зміни ємності  $C$  батареї конденсаторів. Зі зміною ємнісної провідності  $B_C$  змінюються повна провідність  $Y$ , струм в нерозгалуженій частині кола  $I$  та коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  кола. Вказані залежності називаються резонансними кривими. Аналіз цих залежностей показує, що зі зростанням ємності повна провідність кола спочатку зменшується, сягає мінімуму коли  $B_L = B_C$ , потім зростає. Характер зміни струму такий самий, як і повної провідності, оскільки струм прямо пропорційний повній провідності  $I = UY$ . Коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  із зростанням ємності зростає, приймає максимальне значення під час резонансу, а потім зменшується, наближуючись до нуля, оскільки  $\cos \varphi = G/Y$ . Аналіз резонансних кривих дозволяє зробити наступні висновки:

1. Повна провідність кола в стані резонансу мінімальна і дорівнює активній провідності

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G.$$

2. Мінімальна провідність кола спричинює мінімальний струм

$$I = UY = UG.$$

3. Ємнісний струм  $I_2$  та індуктивна складова  $I_L$  струму котушки  $I_1$  однакові за величиною, а активна складова струму котушки  $I_R$  дорівнює струму  $I$ :

$$I_L = B_L U = B_C U = I_2; \quad I_R = GU = YU = I.$$

Реактивні складові струму  $I_L$  та  $I_2$  (в залежності від значень реактивних провідностей) можуть приймати досить великі значення, які перевищують значення струму  $I$ .

4. Реактивна складова повної потужності, яку споживає коло, в стані резонансу, коли  $B_L = B_C$ , дорівнює нулю:

$$Q = B_L U^2 - B_C U^2 = Q_L - Q_C = 0.$$

5. Повна потужність кола в стані резонансу дорівнює її активній складовій

$$S = YU^2 = GU^2 = P.$$

6. Коефіцієнт потужності кола

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{GU^2}{YU^2} = 1.$$

Напруга та струм в колі під час резонансу збігаються за фазою. Векторну діаграму кола (рис. 8.1), що перебуває в стані резонансу, подано на рис. 8.2.

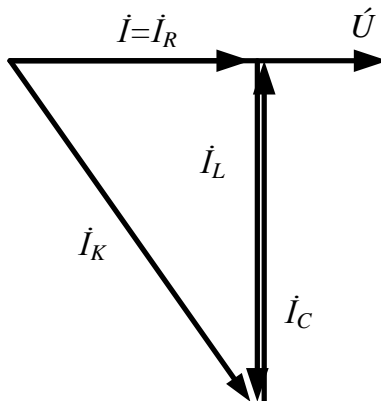


Рис. 8.2

Резонанс струмів широко застосовується в силових електричних колах для збільшення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ , оскільки він має велике техніко-економічне значення. Для збільшення коефіцієнта потужності конденсатори підключаються паралельно до споживачів, які внаслідок індуктивності мають низький  $\cos \varphi$ .

## 8.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з приладами для вимірювання і обладнанням панелей №3, №4 стенда та вимірювальним комплектом K505.
2. Скласти коло відповідно до рис. 8.3 з паралельним з'єднанням конденсатора та котушки, які розташовані на панелі №4, де  $A_1$  і  $A_2$  – амперметри, що знаходяться на панелі №3.

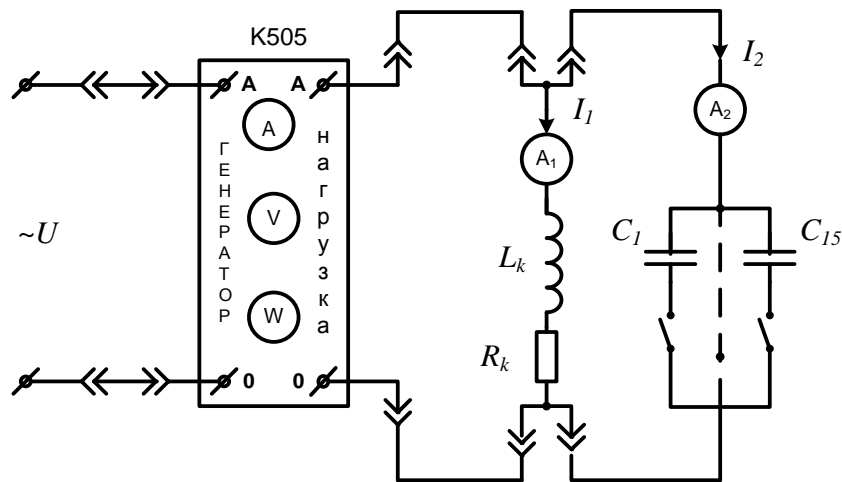


Рис. 8.3

3. Подати на вхід кола напругу не більше 20 В.
4. Змінюючи величину ємності блока конденсаторів в межах від  $C = 0$  до  $C_m$  (значення  $C_m$  визначає керівник занять), занести в таблицю 8.1 значення

Таблиця 8.1

Дані вимірювань							Результати обчислень	
№	$C$	$I$	$U$	$P$	$I_L$	$I_C$	$\cos \varphi$	$\varphi$
	мкФ	А	В	Вт	А	А		град.
1								
...								
9								

напруг  $I$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  та потужностей  $P$ . Окремо відмітити резонанс струмів за  $C = C_0$ , який фіксується за найменшим струмом у нерозгалуженій частині кола.

### 8.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Визначити величини наведені у табл. 8.1, використовуючи формули:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad \varphi = \arctg \frac{B_k - B_C}{G}; \quad B_k = \sqrt{Y_k^2 - G_k^2}; \quad Y = \frac{I}{U}.$$

2. За даними табл.8.1 побудувати векторні діаграми для випадків  $C < C_0$ ,  $C = C_0$ ,  $C > C_0$ .

3. За даними табл. 8.1 побудувати в масштабі на одному рисунку графіки залежностей  $I = f(C)$ ,  $\cos \varphi = f(C)$ ,  $I_1 = f(C)$ ,  $I_2 = f(C)$ ,  $\varphi = f(C)$ .

4. Записати рівняння миттєвого значення вхідної напруги та струму на котушці та конденсаторі, вважати величину початкової фази джерела напруги рівною нулю ( $\psi_u = 0$ ).

5. Зробити короткі висновки про виконану роботу.

### 8.4 Контрольні питання

1. У колі (рис. 8.1) при резонансі струм у вітці з котушкою дорівнює 1 А і відстає від напруги на кут  $60^\circ$ . Розрахувати струм у конденсаторі. Розрахувати струм на вході кола.

2. У колі (рис. 8.1) вхідний струм і струм у конденсаторі дорівнюють 1 А кожний. Розрахувати струм у котушці. Розрахувати кут зсуву фаз між напругою і струмом у котушці.

3. Що зміниться у режимі роботи резонансного кола (рис. 8.1) при підключенні третьої паралельної вітки з резистором  $R$ ?

4. У який спосіб можна досягти резонансу струмів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ЗІРКОЮ

**Мета роботи:** дослідження основних режимів роботи трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою; визначення співвідношень між лінійними й фазними значеннями струмів та напруг; з'ясування впливу нейтрального проводу. Навчитися будувати за дослідними даними векторні діаграми струмів і напруг при симетричному і несиметричному навантаженнях фаз.

#### 9.1 Основні відомості і рекомендації

Електрична енергія в сучасних умовах виробляється переважно джерелами енергії із трифазною системою напруг. Пояснюється це тим, що трифазна система змінного струму є найбільш економічною.

Основною перевагою трифазної системи перед однофазною є те, що вона забезпечує передачу і розподіл енергії з меншими втратами і витратою проводів. Крім того, трифазна система дає можливість створювати обертове магнітне поле, що використовується в двигунах трифазного струму, які мають безперечні технічні і техніко-економічні переваги перед однофазними двигунами.

Трифазні кола – найпоширеніший різновид багатofазних кіл, в яких діють три синусоїдні ЕРС однакові за амплітудою і частотою, але зсунуті у часі одна від одної на третину періоду (тобто на кут  $120^\circ$ ).

Перш ніж розпочати дослідження трифазного кола, необхідно усвідомити поняття, що стосуються трифазних кіл, такі як фаза, лінійний провід, нейтральний провід, зв'язане і незв'язане трифазне коло, з'єднання зіркою і трикутником, симетричне і несиметричне коло.

Окремі електричні кола, які входять до складу трифазної системи називаються **фазами**.

Трифазну систему синусоїдних ЕРС (або струмів) називають **симетричною**, якщо всі ЕРС (або струми) однакові за величиною і кожна ЕРС (або струм) відстає (або випереджає) за фазою від попередньої ЕРС (або струму) на однаковий кут. Якщо не задовольняються ці умови, то система ЕРС (або струмів) **несиметрична**.

Трифазні кола, в яких загальні опори всіх фаз однакові ( $Z_A = Z_B = Z_C$ ), називаються **симетричними**, при цьому  $R_A = R_B = R_C$ ,  $X_A = X_B = X_C$ ,  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$ ; за інших умов — трифазні кола **несиметричні**.

Трифазну систему електричних кіл називають **незв'язаною**, якщо кола, які утворюють цю систему, не з'єднані електрично між фазами. Якщо ж кола електрично з'єднані, то трифазну систему називають **зв'язаною**. На практиці більше поширена зв'язана система.

Кожна обмотка (фаза) генератора має два кінці, один з яких називають початком обмотки, а другий — кінцем. Вибір початків ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) і кінців ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) обмоток довільний. Але в генераторах доцільно називати початками і кінцями відповідні, симетрично розміщені, кінцеві точки обмоток. У такому разі система ЕРС буде **симетричною**, якщо до цього умовно вибрати напрям усіх ЕРС від початків до їх кінців або навпаки — від кінців обмоток до їх початків.

Для створення зручнішої, вигіднішої трифазної системи кінці обмоток генератора і споживачів електрично з'єднують зіркою або трикутником.

З'єднання обмоток генератора **зіркою** вважають таким, коли всі початки або кінці обмоток мають одну спільну, так звану нейтральну (або нульову) точку. Зв'язок між генератором і споживачами здійснюється електричними проводами, що йдуть від кінців усіх обмоток, а іноді й від нейтральної точки генератора. Провід, що йде від кінця обмоток генератора до споживача, називають **лінійним**, а той, що йде від нейтральної (або нульової) точки —



**нейтральним** (або нульовим) проводом.

При з'єднанні обмоток генератора **трикутником** початок обмотки кожної фази з'єднують з кінцем обмотки наступної фази. Зв'язок генератора із споживачами здійснюється **лінійними** проводами, що виходять з спільних точок обмоток генератора.

ЕРС, що індукується в обмотках генератора, напруги на затискачах цих обмоток і струми, що проходять по них, називаються **фазним** і ЕРС ( $e_\phi$ ,  $E_\phi$ ), напругами ( $u_\phi$ ,  $U_\phi$ ) і струмами ( $i_\phi$ ,  $I_\phi$ ), а напруги між лінійними проводами і струми, що проходять у них, – **лінійними** напругами ( $u_\text{л}$ ,  $U_\text{л}$ ) і струмами ( $i_\text{л}$ ,  $I_\text{л}$ ).

З'єднання споживачів зіркою і трикутником виконують аналогічно до відповідних з'єднань обмоток генератора. Визначення фазних і лінійних напруг і струмів для споживачів залишаються такими самими, як і для генераторів.

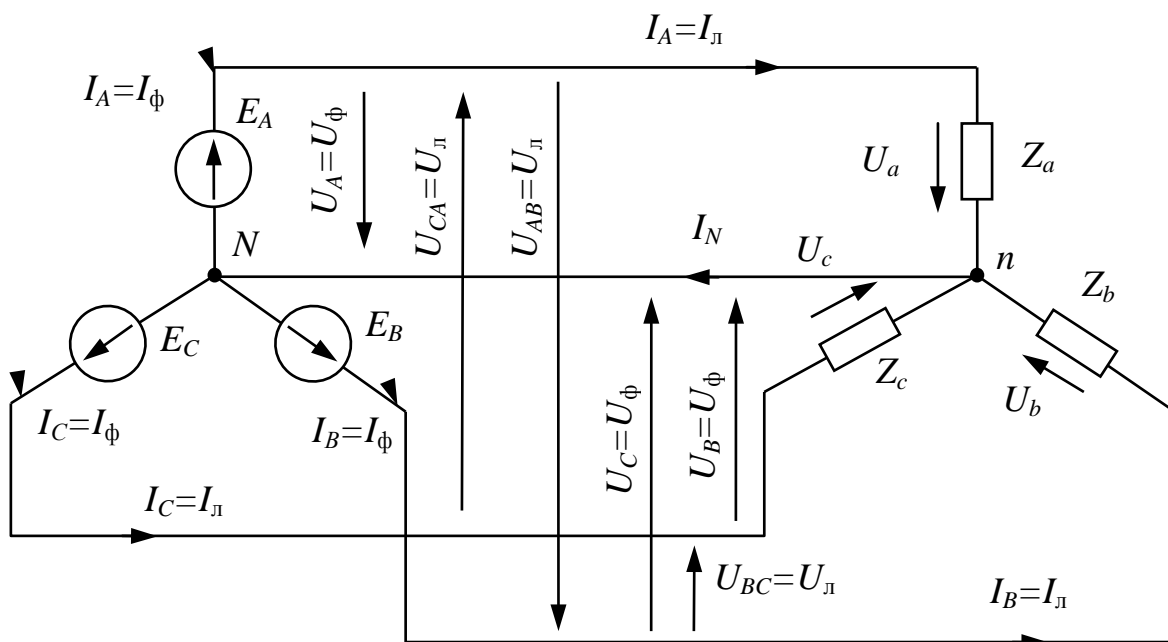


Рис 9.1

Надалі умовимось у трифазній системі кіл струми направляти так, щоб усі лінійні струми були направлені до споживачів, а фазні струми в сторонах трикутника – за рухом годинникової стрілки. Фазні струми в променях зірки

споживачів, будуть сходиться в нейтральній точці. Результируючий струм  $i_0$  по нейтральному проводу піде до нейтральної точки генератора (N).

Напрями всіх ЕРС і напруг відповідатимуть напрямам відповідних струмів.

Для симетричної трифазної ЕРС в будь-який момент часу дійсні співвідношення:

$$e_A + e_B + e_C = 0,$$

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$$

Зі схеми видно, що при з'єднанні споживачів зіркою його фазами протікають ті ж струми, що й лінійними проводами. Тобто фазні струми виявляються рівними відповідним лінійним струмам:

$$I_\phi = I_\pi$$

Фазні струми споживача визначають за законом Ома:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c$$

При цьому, згідно з першим законом Кірхгофа, можна записати:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

При з'єднанні споживача зіркою, незалежно від величини й характеру опорів його фаз, а також від того, є або відсутній нейтральний провід, між лінійними й фазними напругами споживача існують наступні співвідношення, отримані згідно до другого закону Кірхгофа:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a$$

Миттєві значення ЕРС що утворюють симетричну систему:

$$e_A = E_m \cdot \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

$$e_C = E_m \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3),$$

якщо рахувати, що початкова фаза ЕРС  $e_A = 0$ .

Оскільки трифазні кола є різновидом складних електричних кіл, Їх можна розрахувати, застосовуючи відомі методи розрахунку складних кіл.

Найбільш простіше виконується розрахунок симетричних трифазних кіл. Для цього достатньо провести розрахунок однієї фази. В інших фазах струми й напруги перебувають в умовах симетрії. Окремо кожна фаза становить зазвичай просте коло. На рис. 9.2 зображена векторна діаграма для симетричного трифазного кола при з'єднанні зіркою.

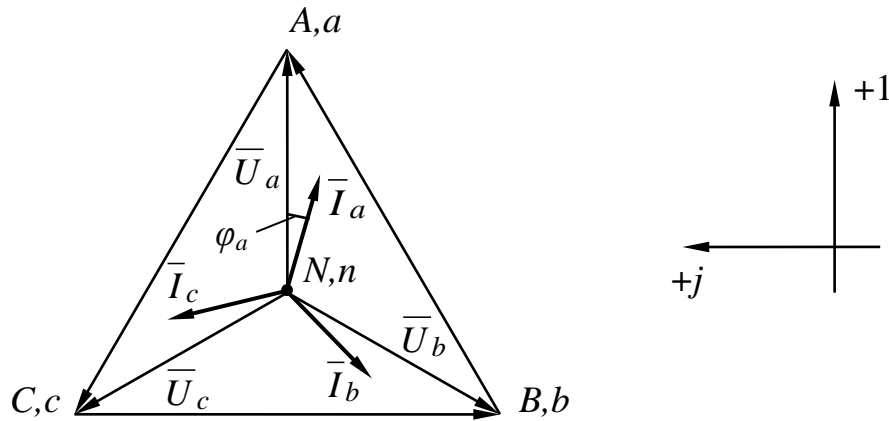


Рис 9.2

З векторної діаграми видно, що лінійні напруги більші від фазних у  $\sqrt{3}$  раз, тобто  $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$ .

Так як фазні напруги та фазні опори споживача електроенергії рівні між собою, то й фазні струми при симетричному навантаженні також рівні між собою і зміщені відносно фазних напруг на рівні кути  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_{\text{ф}}$ , визначених з виразу:

$$\operatorname{tg} \varphi_a = X_a / R_a = \operatorname{tg} \varphi_b = X_b / R_b = \operatorname{tg} \varphi_c = X_c / R_c$$

При симетричному навантаженні струм у нейтральному проводі, визначений як векторна сума фазних струмів, виявляється рівним нулю, тому при симетричному навантаженні цей провід стає непотрібним і застосовувати його немає рації.

При несиметричному навантаженні комплексні опори ( $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$ ) всіх трьох фаз у загальному випадку не рівні між собою.

Нехтуючи опорами лінійних проводів, можна вважати, що лінійні

напруги споживача незалежно від характеру навантаження рівні відповідним лінійним напругам генератора, тобто система лінійних напруг і при несиметричному навантаженні симетрична.

При увімкненні нейтрального проводу та несиметричному навантаженні (опором нейтрального проводу нехтуємо) потенціал нейтральної точки споживача дорівнює потенціалу нейтральної точки генератора. Отже, фазні напруги споживача рівні відповідним фазним напругам генератора.

При наявності нейтрального проводу і несиметричному навантаженні геометрична сума фазних струмів трифазної системи, відповідно до першого закону Кірхгофа для нейтральної точки, дорівнює струмові в нейтральному проводі.

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \neq 0$$

При цьому сумісна векторна діаграма напруг і струмів для несиметричного навантаження з нейтральним проводом має вигляд, представлений на рис. 9.3.

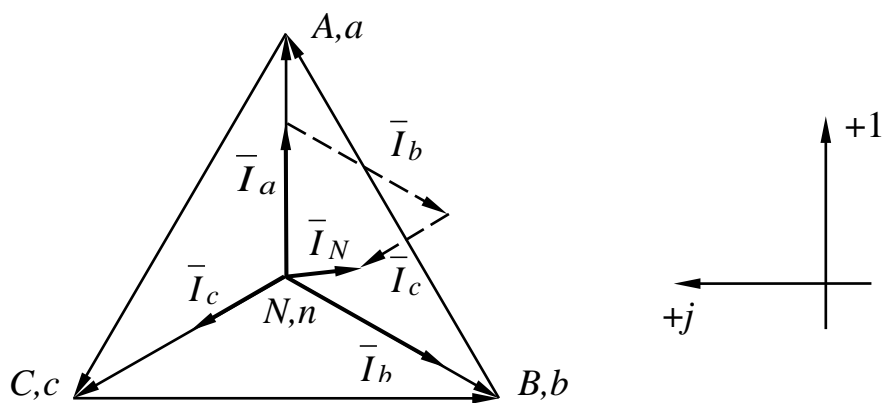


Рис 9.3

При відключенні нейтрального проводу, за умови несиметричного навантаження, потенціал нейтральної точки (n) споживача електроенергії не дорівнює потенціалу нейтральної точки (N) генератора, тому що ці точки не з'єднані між собою. При цьому нейтральна точка (n) на векторній діаграмі

споживача зміститься зі свого первісного положення в інше ( $n'$ ), при якому геометрична сума фазних струмів споживача дорівнює нулю:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$$

У цьому випадку сумісна векторна діаграма напруг і струмів приймає вигляд, представлений на рис. 9.4, з якої видно, що при несиметричному навантаженні в трифазній системі без нейтрального проводу фазні напруги споживача не дорівнюють одна одній. При цьому одні фазні напруги можуть бути менші в порівнянні з фазними напругами генератора, а інші – більші.

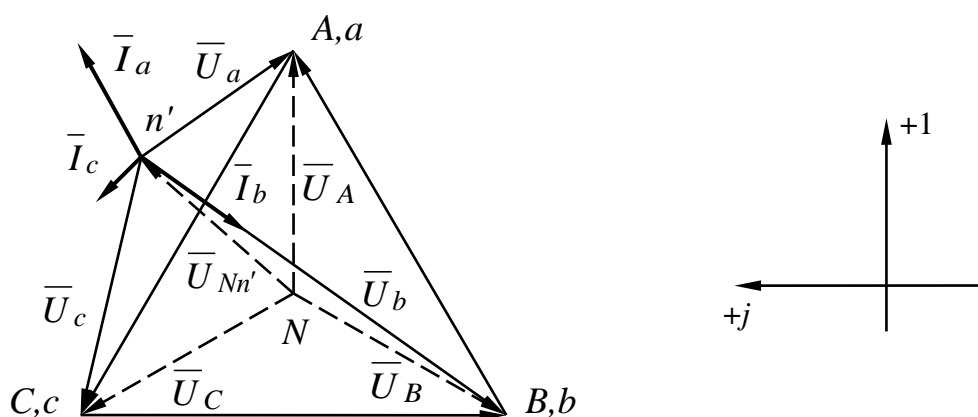


Рис 9.4

Розрахунок несиметричного трифазного кола необхідно проводити як розрахунок складного кола, застосовуючи формулу, що визначає напругу між нейтральними точками джерела і приймача енергії.

Коротке замикання однієї фази споживача електроенергії, з'єднаного зіркою без нейтрального проводу, варто розглядати як окремий випадок несиметричного навантаження, при якому напруга на короткозамкненій фазі споживача дорівнює нулю, а значення напруг на двох інших фазах збільшується до значень, рівних лінійним напругам (рис. 9.5). Нейтральна точка ( $n$ ) на векторній діаграмі зміщується в цьому випадку у вершину трикутника лінійних напруг ( $n'$ ), що відповідає короткозамкненій фазі. При цьому напруга

( $U_{Nn'}$ ) між нейтральними точками генератора і споживача стає рівною фазній напрузі генератора живлення.

Струм у короткозамкненій фазі залежить від опорів, увімкнених у двох інших фазах споживача. Геометрична сума векторів всіх трьох фазних струмів у цьому випадку дорівнює нулю.

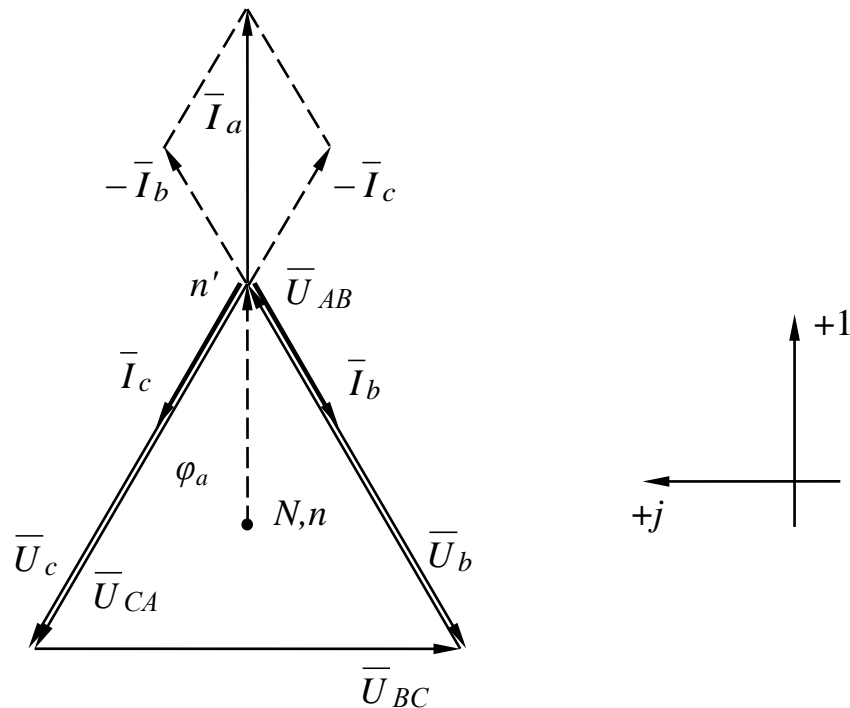


Рис 9.5

Відключення навантаження однієї з фаз у трифазній системі при з'єднанні споживача електроенергії зіркою без нейтрального проводу можна розглядати як окремий випадок несиметричного навантаження, коли опір розвантаженої фази дорівнює нескінченності. При цьому, якщо опори двох інших фаз виявляються однакові, то нейтральна точка ( $n$ ) на векторній діаграмі переміститься в точку ( $n'$ ) – середину однієї зі сторін трикутника лінійних напруг (рис. 9.6).

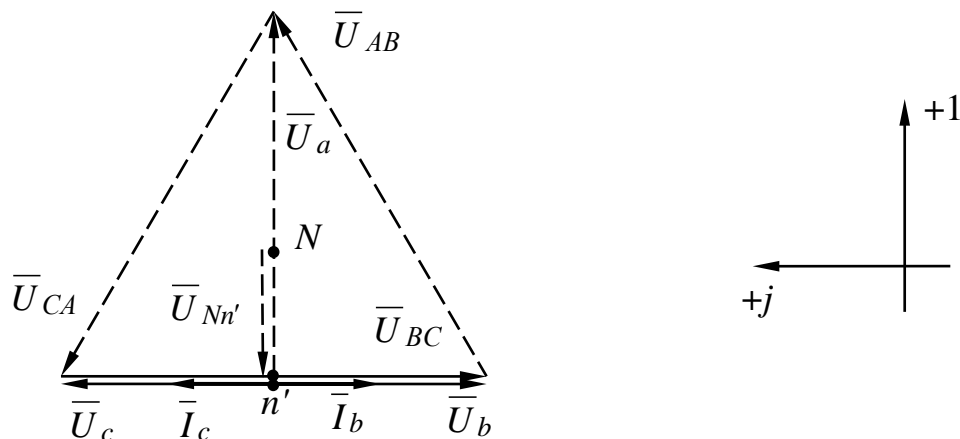


Рис 9.6

При обриві лінійного проводу трифазний споживач перебуває під лінійною напругою, тому що при цьому жодна із точок навантаження не буде під потенціалом обірваного лінійного проводу. У цьому випадку векторна діаграма трифазного споживача при з'єднанні зіркою та відсутності нейтрального проводу набуває вигляду який наведено на рис. 9.7.

При обриві лінійного проводу і при наявності нейтрального проводу, наприклад фази А, потенціали точок **a** і **n** рівні, тому положення цих точок збігаються.

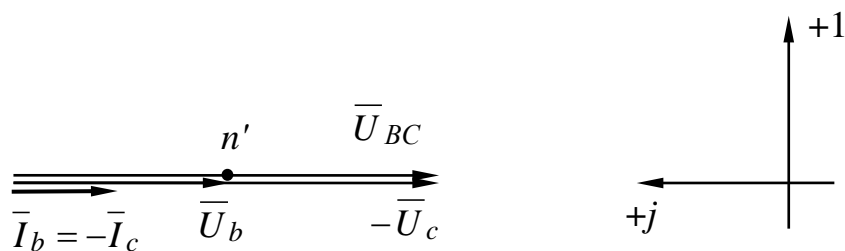


Рис 9.7

Побудова векторних діаграм починається з побудови векторів напруги симетричного джерела. Відкладаємо в масштабі три вектори однакових по модулю фазних напруг  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  с кутом  $120^\circ$  між ними. З'єднавши точки

А, В, С, згідно  $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$ ,  $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$  побудуємо вектори лінійних напруг джерела. При наявності лінійних і нейтрального проводів потенціали відповідних точок джерела й приймача збігаються, отже, діаграма справедлива й для трифазного навантаження.

Вектори струмів будуюмо відносно власних напруг навантаження під кутом  $\varphi$ , з огляду на його знак (рис 9.2). Без нейтрального проводу і при несиметричному режимі потенціали точок **N** і **n** неоднакові. Положення точки **n** визначаємо перетином фазних напруг споживача.

Виконуючи дану лабораторну роботу, необхідно розібратися з питанням вимірювання потужності трифазного кола, що має важливе практичне значення. Активну потужність симетричного кола можна вимірювати одним ватметром. Якщо коло є несиметричним, варто скористатися методом трьох ватметрів. Вимірювати реактивну потужність при симетричному навантаженні можна за допомогою одного ватметра, у якому обмотка струму ввімкнена, наприклад, у фазу А, а обмотка напруги підключена на «чужі фази» В і С.

## 9.2 Порядок виконання роботи.

1. Ознайомитися з вимірювальними приладами та устаткуванням, що використовується при виконанні роботи, а також зі схемою підключення вимірювального комплексу К505 при вимірюванні струмів, напруг і потужностей у трифазних трипроводних і чотирипровідних електричних колах.

2. Дослідити трифазне коло при з'єднанні споживачів електричної енергії зіркою з нейтральним проводом (див. рис. 9.8).

3. Зібрати чотирипровідне трифазне коло за монтажною схемою (рис. 9.9), використовуючи в якості навантаження для кожної фази послідовно з'єднані резистори, що розташовані на панелі 2. Живлення кола здійснювати від трифазного джерела, розташованого на панелі джерел живлення з лінійною напругою 220 В.



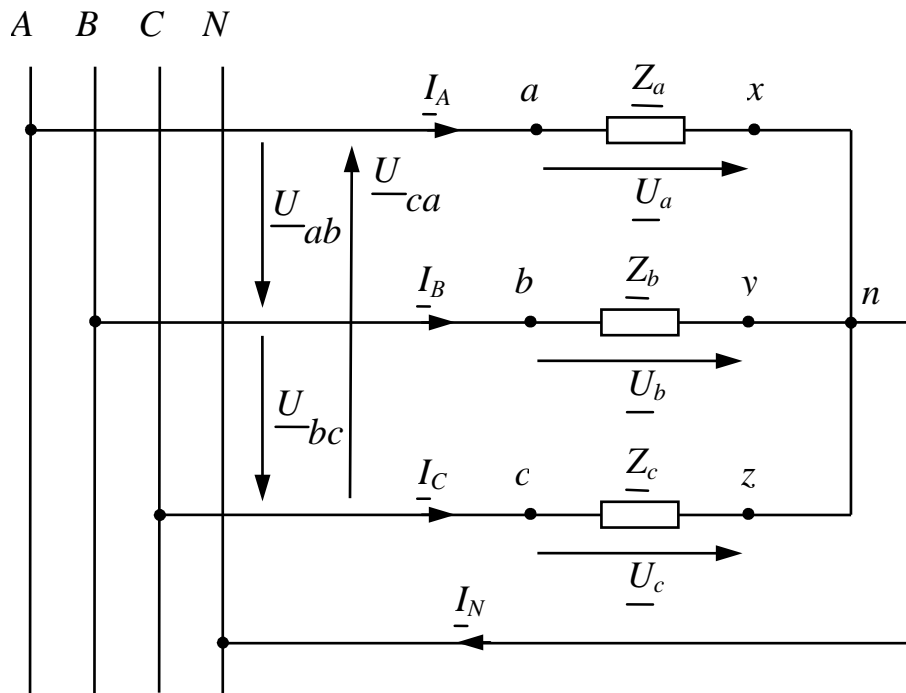


Рис 9.8

4. Виконати дослід "активно-симетричний режим навантаження". Для цього необхідно за допомогою змінних резисторів встановити однакові струми у трьох фазах.

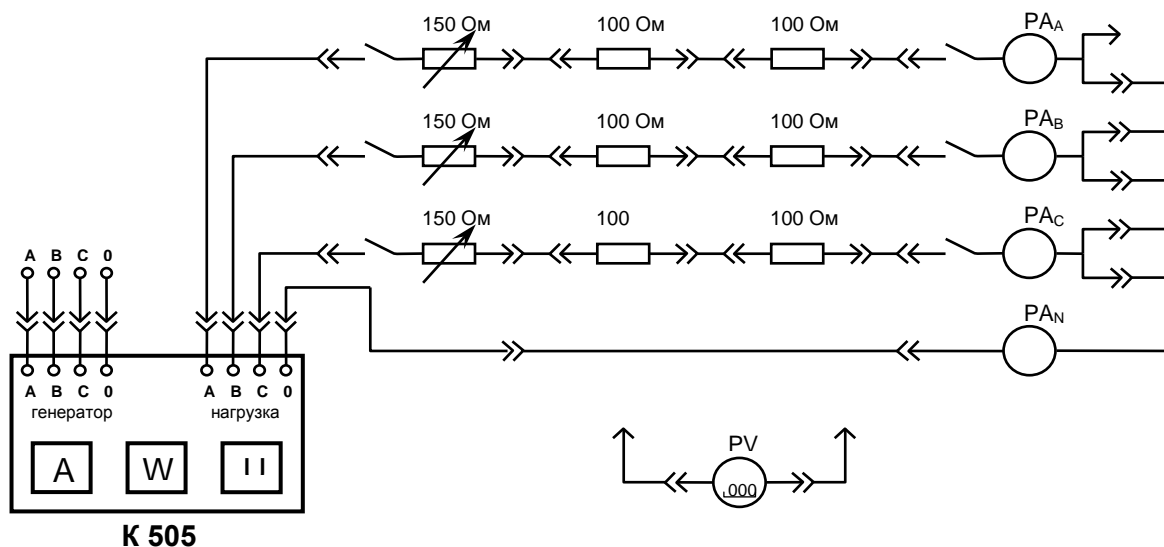


Рис 9.9

5. Виміряти струми й потужності у фазах за допомогою вимірювального комплексу K505. Вимірювання фазних і лінійних напруг здійснити цифровим

вольтметром, по черзі підключаючи його до відповідних точок кола. Дані вимірювань занести до таблиці 9.1.

6. Виконати дослід "активно-несиметричний режим навантаження". Для цього необхідно за допомогою змінних резисторів встановити різні струми у трьох фазах і виконати дії зазначені у п.5.

7. Виконати дослід "обрив одного лінійного проводу". Для цього необхідно від'єднати один провідник від будь-якого штекерного гнізда "А", "В", "С" джерела живлення і виконати дії зазначені у п.5. Після виконання вимірів провідник, що від'єдали повернути на своє місце.

8. Виконати дослід "розвантаження однієї фази". Для цього необхідно вимкнути один із вимикачів розташованих на панелі 2 і виконати дії зазначені у п.5. Після виконання вимірів повернути вимикач у вихідний стан.

Таблиця 9.1

Режим навантаження	Дані вимірювань													Результати обчислень	
	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$I_N$	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P$	$U_L/U_\phi$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Від.од.
Активно-симетричний															
Активно-несиметричний															
Обрив одного лінійного проводу															
Розвантаження однієї фази															
Активно-індуктивний															
Активно-ємнісний															

9. Виконати дослід "активно-індуктивний режим навантаження". Для цього необхідно скласти коло відповідно до рис. 9.10, в якості індуктивності використовувати котушку індуктивності розташовану на панелі 4. Далі виконати дії зазначені у п.5.

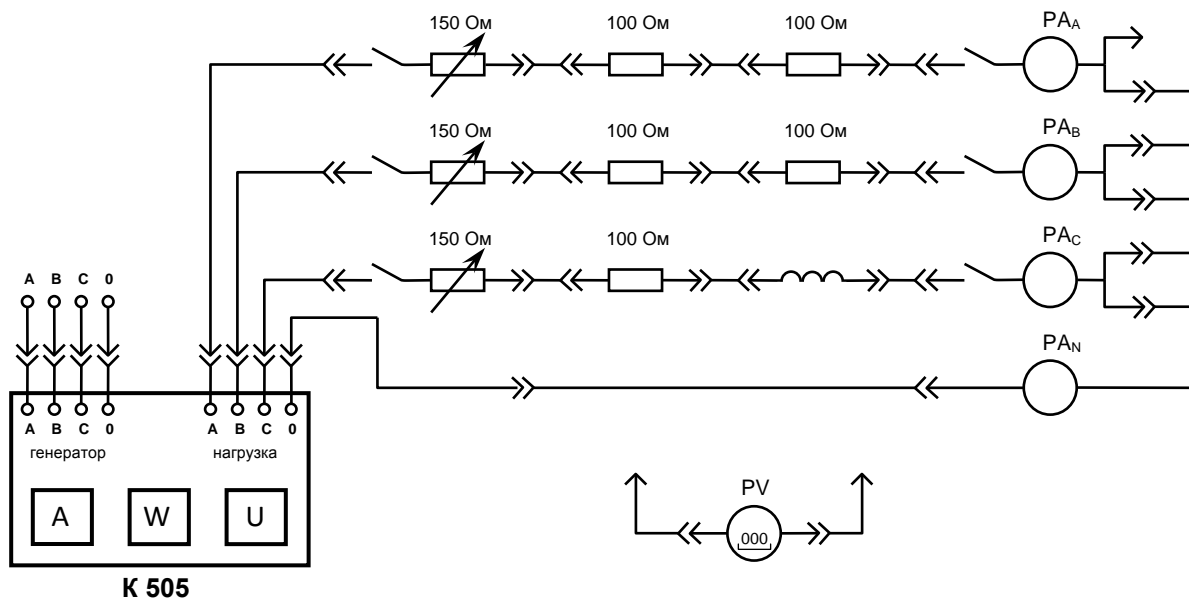


Рис 9.10

10. Виконати дослід «активно-ємнісний режим навантаження». Для цього необхідно скласти коло відповідно до рис. 9.11, використовуючи ємність розташовану на панелі 4. Далі виконати дії зазначені у п.5.

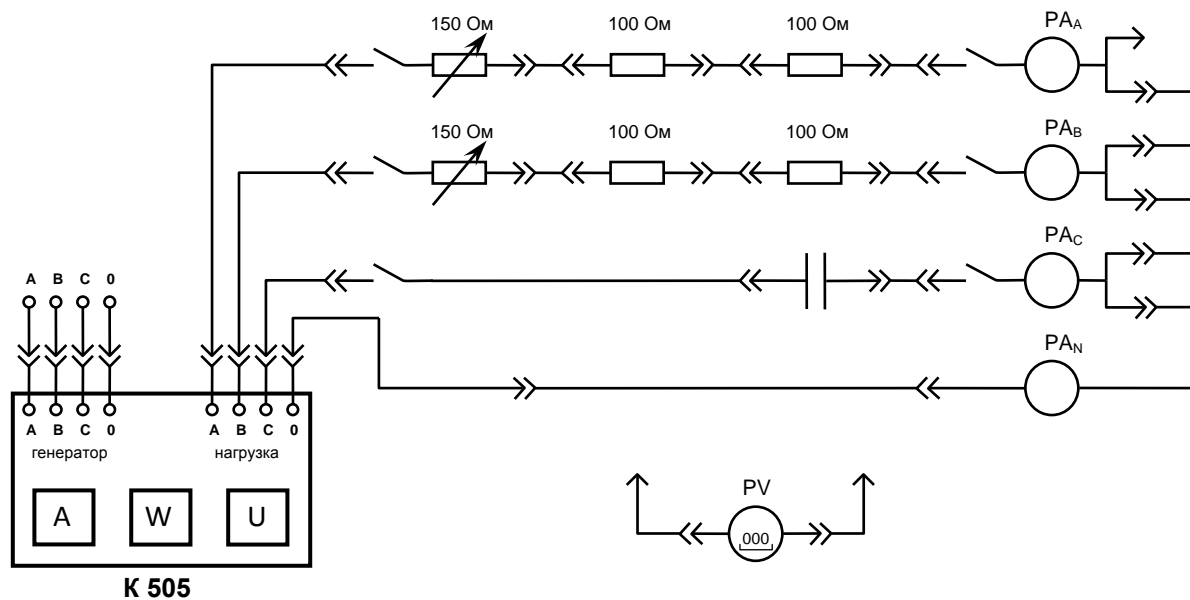


Рис 9.11

енергії зіркою без нейтрального проводу (див. рис.9.12).

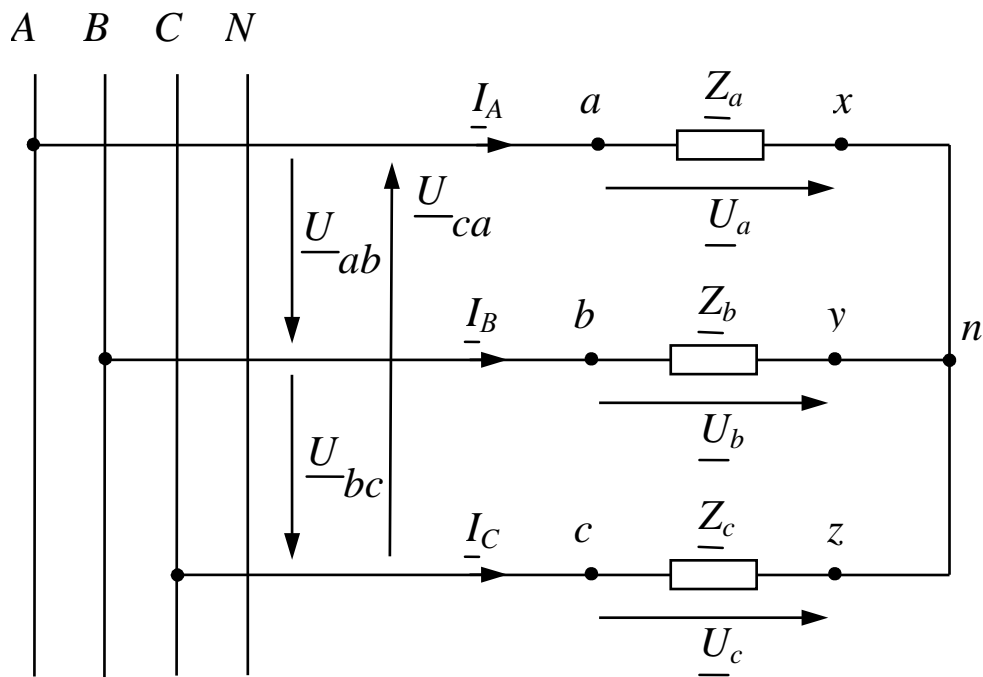


Рис 9.12

(необхідно від'єднати провідник від штекерного гнізда "0" джерела живлення).

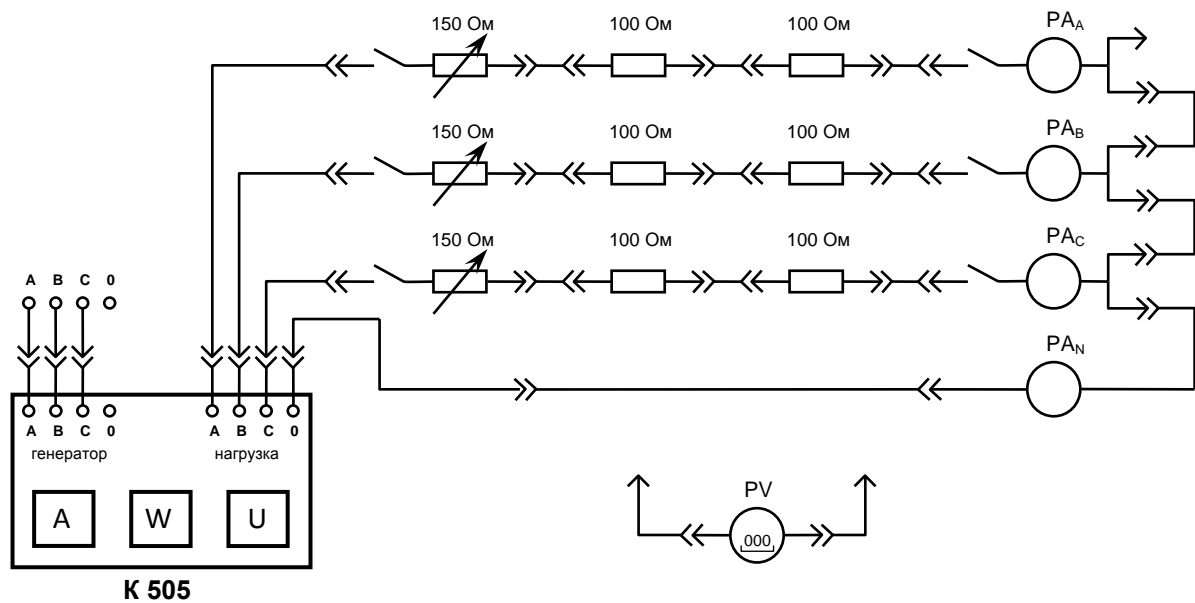


Рис 9.13

Після чого виконати дії зазначені в пп.4-10. Результати вимірів занести в таблицю 9.2.

Таблиця 9.2

Режим навантаження	Дані вимірювань													Результати обчислень	
	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$U_{Nn}$	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P$	$U_{\Delta}/U_{\phi}$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	В	Вт	Вт	Вт	Вт	Від.од
Активно - симетричний															
Активно - несиметричний															
Обрив одного лінійного проводу															
Розвантаження однієї фази															
Активно - індуктивний															
Активно - ємнісний															
Коротке замикання															

### 9.3 Опрацювання результатів досліджень

1. У трипровідному трифазному електричному колі розрахувати співвідношення між лінійними і фазними струмами та напругами при симетричному та несиметричному режимах роботи.

2. У чотирипровідному трифазному електричному колі розрахувати співвідношення між лінійними і фазними струмами та напругами при симетричному та несиметричному режимах роботи.

3. Для кіл, що досліджувались, побудувати векторні діаграми струмів і напруг для всіх режимів навантаження.

4. Визначити графічно по векторних діаграмах у прийнятих масштабах:

- струм у нейтральному проводі для режиму обриву одного лінійного проводу;

- напругу зміщення нейтральної точки для кола без нейтрального проводу.

5. За даними табл.9.1 для одного з режимів навантаження написати комплекси фазних і лінійних напруг, струмів (табл.9.3).

6. Скласти короткі висновки по роботі.

Таблиця 9.3

$U_{\phi}$	$U_L$	$I_{\phi}$
В	В	А
$\underline{U}_a =$	$\underline{U}_{ab} =$	$\underline{I}_A =$
$\underline{U}_b =$	$\underline{U}_{bc} =$	$\underline{I}_B =$
$\underline{U}_c =$	$\underline{U}_{ca} =$	$\underline{I}_C =$

#### 9.4 Контрольні питання

1. Напишіть миттєве значення ЕРС симетричного трифазного джерела.
2. Які напруги вважаються фазними й лінійними? Як вони вимірюються?
3. Яке призначення має нейтральний провід? Чому не ставлять запобіжник у нейтральному проводі?
4. Від чого залежить фазна напруга на затискачах приймача за відсутності нейтрального проводу?
5. Яке співвідношення між лінійними й фазними напругами для симетричного й несиметричного навантажень?
6. Як визначаються активна й реактивна потужності для симетричного й несиметричного навантажень за дослідними даними?
7. Знайти графічно й аналітично в загальному вигляді силу струму в нейтральному проводі у випадку обриву одного лінійного проводу, якщо до обриву навантаження було симетричним.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА, ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ТРИКУТНИКОМ

**Мета роботи:** дослідити режими роботи трифазного кола, з'єданого трикутником; навчитися будувати за дослідними даними векторні діаграми струмів і напруг у випадках симетричного і несиметричного навантаження фаз.

#### 10.1 Основні теоретичні відомості

За з'єднання трикутником кінець однієї фази споживача з'єднується з початком іншої фази так, що вони утворюють замкнутий контур (трикутник). Точки з'єднання двох фаз підключаються до лінійних проводів лінії електропередач (рис. 10.1), тому на кожну фазу споживача подана своя певна лінійна напруга. Отже, за такого з'єднання фазна і лінійна напруга споживача – одна і та сама напруга:  $U_{\phi} = U_L$ .

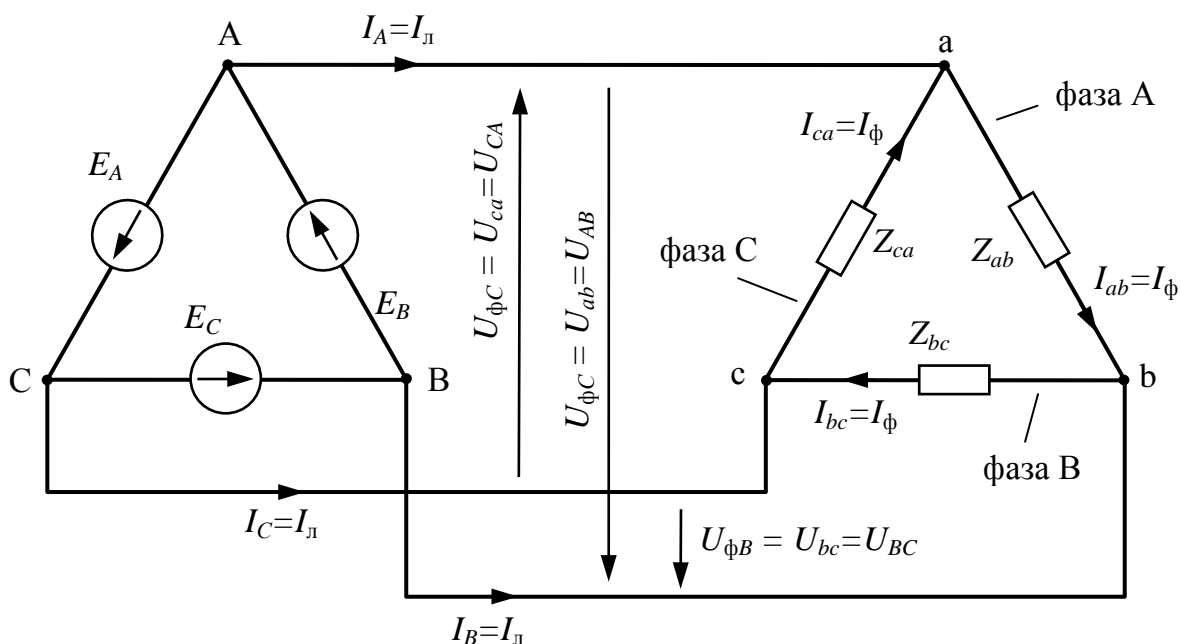


Рис. 10.1

Якщо знехтувати опорами лінійних проводів, то можна вважати, що напруги на фазах споживача дорівнюють лінійним напругам трифазної мережі:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{AB} = U_{\text{Л}} \cdot e^{j30^\circ}, \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U}_{BC} = U_{\text{Л}} \cdot e^{-j90^\circ}, \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U}_{CA} = U_{\text{Л}} \cdot e^{+j150^\circ}.\end{aligned}$$

У випадках  $Z_{\text{Л}} = 0$  зміна режиму однієї фази споживача не впливає на роботу двох інших фаз, оскільки вони підключені до різних лінійних напруг генератора.

Незалежно від наявності опорів у лінійних проводах для напруг споживача виконується співвідношення:  $\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca} = 0$

Точки **a, в, с**, з'єднання фаз споживача і лінійних проводів є точками розгалуження, тому при з'єднанні трикутником розрізняють фазні та лінійні струми.

У загальному випадку несиметричного навантаження фаз  $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$  фазні струми визначають за законом Ома для кожної фази:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{U_{\text{Л}} \cdot e^{j30^\circ}}{\underline{Z}_{ab}}; \\ \dot{I}_{bc} &= \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{U_{\text{Л}} \cdot e^{-j90^\circ}}{\underline{Z}_{bc}}; \\ \dot{I}_{ca} &= \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{U_{\text{Л}} \cdot e^{j150^\circ}}{\underline{Z}_{ca}},\end{aligned}$$

а лінійні струми розраховують за першим законом Кірхгофа окремо для кожного лінійного проводу:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.\end{aligned}$$

На комплексній площині вектори фазних струмів утворюють різнопроменеку зірку, а лінійні струми – різносторонній трикутник (рис. 10.2).



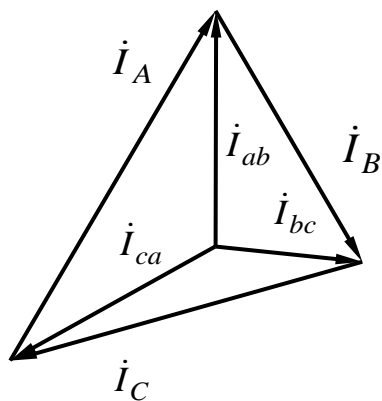


Рис. 10.2

У окремому випадку симетричного навантаження  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$  фазні струми мають однакове значення і зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$  один відносно одного, тобто вони утворюють симетричну трифазну систему:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ab} &= I_\Phi \cdot e^{j\varphi}; \\ \dot{I}_{bc} &= I_{ab} \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{I}_{ca} &= I_{ab} \cdot e^{+j120^\circ}, \end{aligned}$$

Відповідно лінійні струми також утворюють симетричну трифазну систему:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_L \cdot e^{j\varphi}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{+j120^\circ}.$$

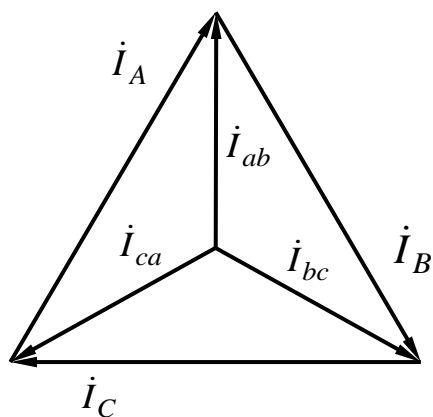


Рис. 10.3

На векторній діаграмі фазні струми зображуються рівносторонньою зіркою, а лінійні струми – рівностороннім трикутником (рис. 10.3). У такому випадку  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$ .

З викладеного випливає, що для симетричного навантаження достатньо розрахувати лише один фазний струм, а тоді за формулою  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi$  обчислити значення лінійних струмів.

Побудову векторної діаграми виконують у такій послідовності:

- 1) вибирають масштаб напруг і на комплексній площині з повернутими осями відкладають напруги  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$  напруги на фазах споживача (рис. 10.4);
- 2) вибирають масштаб струмів і відкладають фазні струми у такій послідовності (рис. 10.5):

струм  $I_{ab}$  під кутом  $\varphi_a = \arctg(X_{ab}/R_{ab})$  до напруги  $U_{ab}$ ;

струм  $I_{bc}$  під кутом  $\varphi_b = \arctg(X_{bc}/R_{bc})$  до напруги  $U_{bc}$ ;

струм  $I_{ca}$  під кутом  $\varphi_c = \arctg(X_{ca}/R_{ca})$  до напруги  $U_{ca}$ ;

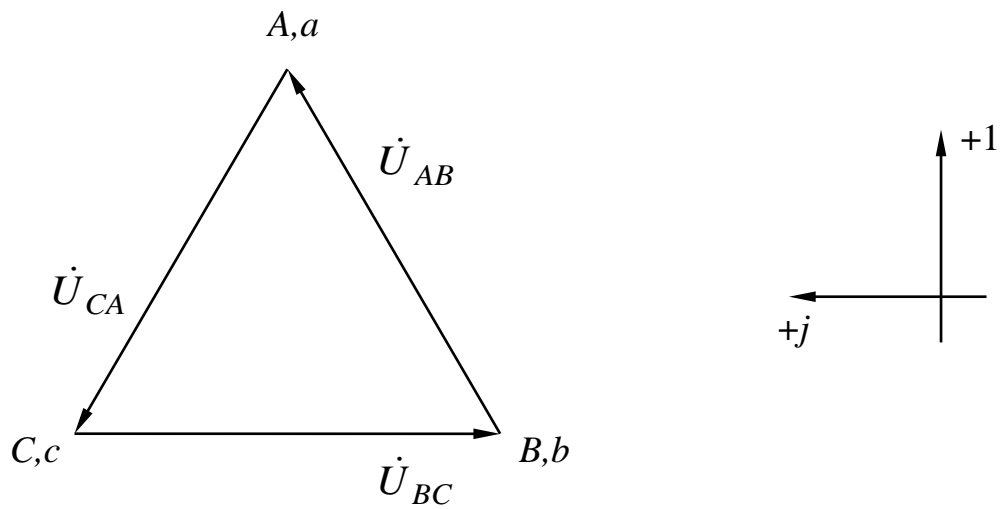


Рис. 10.4

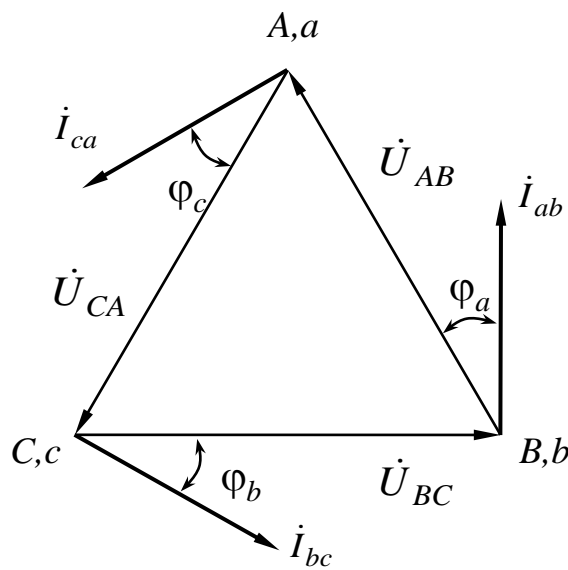


Рис. 10.5

- 3) Будують вектори лінійних струмів, скориставшись першим законом Кірхгофа у векторній формі:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Як приклад рис. 10.6,а зображено електричну схему і векторну діаграму рис. 10.6,б для несиметричного навантаження.

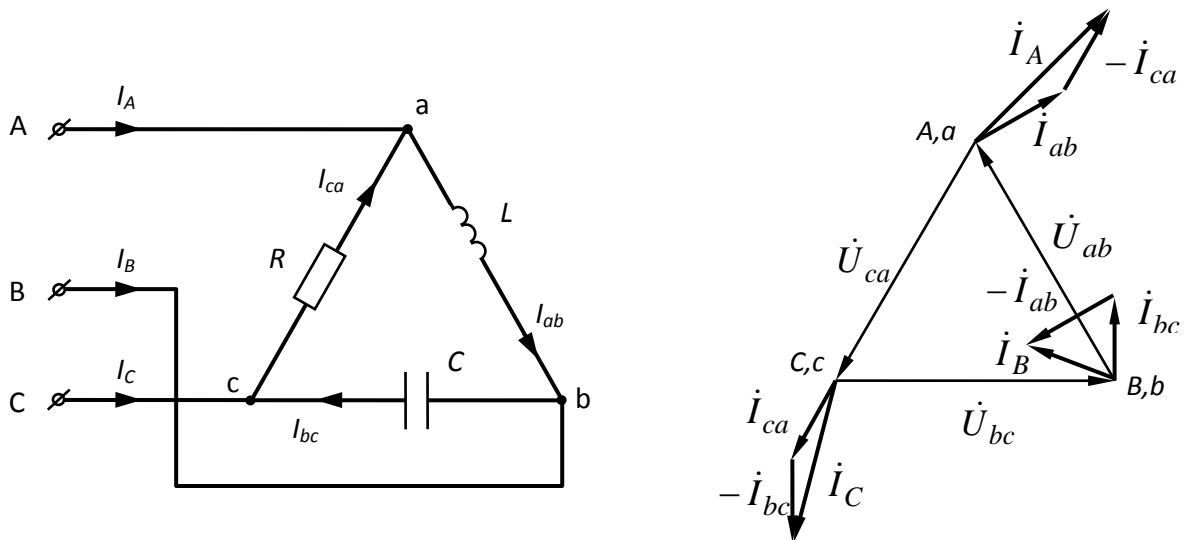


Рис. 10.6

Відключення навантаження однієї з фаз у трифазному колі, з'єднаному трикутником, можна розглядати як окремий випадок несиметричного навантаження, коли опір розвантаженої фази дорівнює нескінченності, а фазний струм у ній дорівнює 0. Інші фазні струми не змінюються. На рис. 10.7 зображено векторну діаграму струмів при розвантаженні фази **ab**.

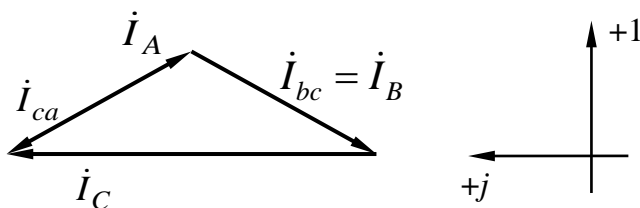


Рис. 10.7

При обриві лінійного проводу, за умови з'єднання симетричного споживача трикутником, трифазне коло перетвориться в однофазне коло. Фази споживача утворюють дві паралельні вітки,

до яких підведена лінійна (фазна) напруга. Струм в одній вітці залишиться незмінним, а в іншій буде менше в два рази від нього. Два лінійні струми будуть рівні між собою і протилежні по фазі.

## 10.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з устаткуванням, що використовується при виконанні роботи, а також зі схемою підключення вимірювального комплексу K505 у трифазних трипровідних електричних колах.
2. Скласти досліджуване коло (рис. 10.8), скориставшись монтажною схемою (рис. 10.9), де кожна фаза навантаження являє собою три послідовно з'єднані резистори, розміщені на панелі №2.

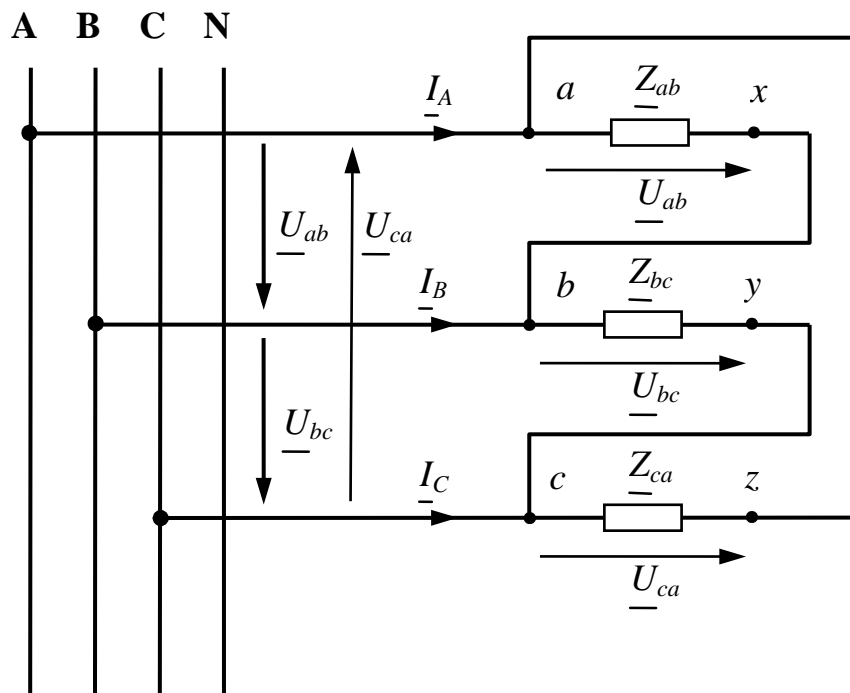


Рис. 10.8

3. Підключити коло до трифазного джерела живлення з лінійною напругою 220 В, яке розташовано на панелі столу.
4. Провести дослід "активно-симетричний режим навантаження". Для цього за допомогою змінних резисторів встановити у всіх 3 фазах однакові струми.
5. Виміряти струми й потужності у фазах за допомогою вимірювального комплексу K505. Вимірювання напруг здійснити цифровим вольтметром, по черзі підключаючи його до відповідних точок кола. Дані вимірювань занести до таблиці 10.1.

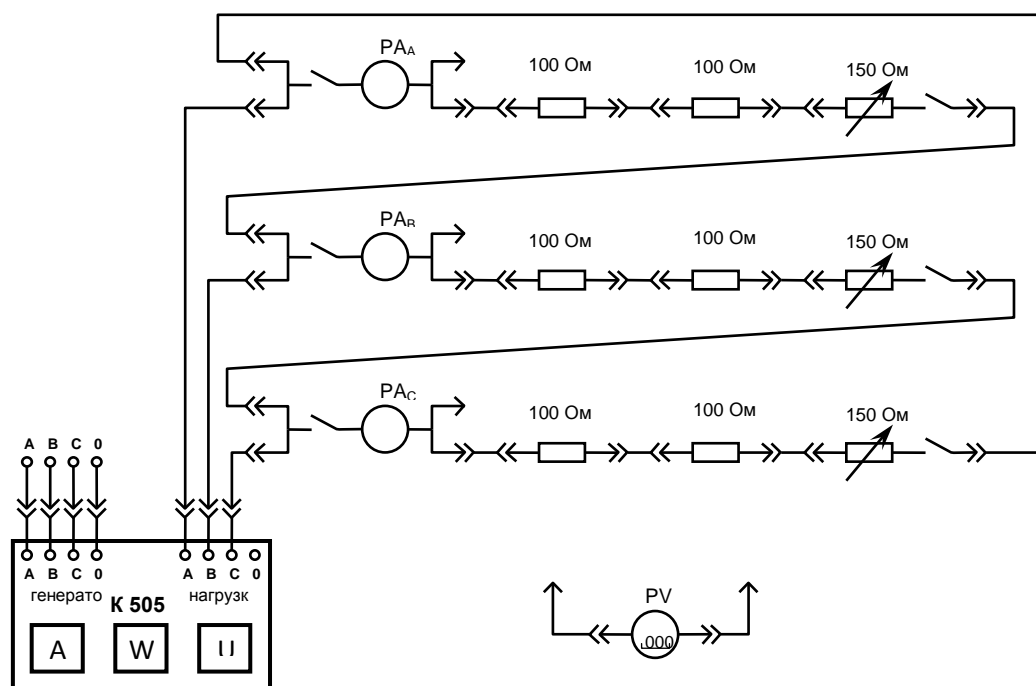


Рис. 10.9

Таблиця 10.1

Режим навантаження	Дані вимірювань												Результати обчислень		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{av}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$\sum P$	$I_L/I_\phi$	$P$
	A	A	A	A	A	A	B	B	B	Вт	Вт	Вт	Вт	від.од.	Вт
Активно-симетричний															
Активно-несиметричний															
Обрив одного лінійного проводу															
Розвантаження однієї фази															
Розвантаження двох фаз															
Активно-індуктивний															
Активно-ємнісний															

6. Провести дослід "активно-несиметричний режим навантаження". Для цього необхідно за допомогою змінних резисторів встановити різні фазні струми у трьох фазах і виконати дії зазначені у п.5.

7. Провести дослід "обрив одного лінійного проводу". Для цього необхідно від'єднати за вказівкою викладача один провідник від будь-якого штекерного гнізда "А", "В", "С" джерела живлення і виконати дії вказані у п.5. Після завершення вимірів провідник, що від'єднали, слід повернути на своє місце.

8. Провести дослід "розвантаження однієї фази". Для цього необхідно вимкнути за вказівкою викладача один із вимикачів розташованих на панелі 2 і виконати дії вказані у п.5.

9. Провести дослід "розвантаження двох фаз". Для цього необхідно вимкнути два вимикача розташованих на панелі 2 і виконати дії вказані у п.5. Після виконання вимірів повернути вимикачі у вихідний стан.

10. Провести дослід " активно-індуктивний режим навантаження ". Для цього необхідно скласти коло відповідно до рис. 10.10, в якості індуктивності використовувати котушку індуктивності розташовану на панелі 4. Далі виконати дії вказані у п.5.

11. Провести дослід " активно-ємнісний режим навантаження ". Для цього необхідно скласти коло відповідно до рис. 10.11, використовуючи ємність розташовану на панелі 4 . Значення ємності встановити за вказівкою викладача. Далі виконати дії вказані у п.5.

### **10.3 Опрацювання результатів досліджень**

1. У досліджуваному колі розрахувати співвідношення між лінійними й фазними струмами у випадках симетричного та несиметричного навантаження.

2. Розрахувати потужність трифазної системи для всіх режимів роботи за формулами:  $P = U_{AB} \cdot I_{ab} + U_{BC} \cdot I_{bc} + U_{CA} \cdot I_{ca}$ ,  $\sum P = P_a + P_b + P_c$ . При вмиканні трифазного споживача за трипровідною схемою і несиметричному навантаженні покази ватметра комплекту К505 при вимірюванні фазних потужностей  $P_a$ ,  $P_b$  і  $P_c$  не відповідають дійсним фазним потужностям,

оскільки обмотка ватметра підключена до штучної нульової точки, сумарна ж потужність споживача  $P = P_a + P_b + P_c$  відповідає дійсній потужності.

3. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг для всіх режимів навантаження.

4. За даними табл.10.1 для активно-симетричного режиму навантаження написати вирази фазних і лінійних струмів, напруг у комплексному вигляді в алгебраїчній та показовій формах (табл.10.2).

5. Зробити короткі висновки по роботі.

Таблиця 10.2

$U$	$I_\phi$	$I_L$
В	А	А
$\dot{U}_{ab} =$	$\dot{I}_{ab} =$	$\dot{I}_A =$
$\dot{U}_{bc} =$	$\dot{I}_{bc} =$	$\dot{I}_B =$
$\dot{U}_{ca} =$	$\dot{I}_{ca} =$	$\dot{I}_C =$

#### 10.4 Контрольні питання

1. Яким чином з'єднуються джерела і навантаження трикутником? Намалуйте електричну схему такого з'єднання.

2. Які струми вважаються фазними й лінійними? Як вони вимірюються?

3. Яке співвідношення між лінійними й фазними струмами для симетричного й несиметричного навантаження, з'єданого трикутником, у векторній та алгебраїчній формі?

4. Вказати умови симетрії трифазного споживача енергії.

5. Як визначаються активна й реактивна потужності для симетричного й несиметричного навантажень за дослідними даними?

6. Пояснити побудову векторної діаграми напруг і струмів для несиметричного навантаження.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСУ У КОЛІ З ОДНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ

**Мета роботи:** дослідження перехідних процесів у лінійних електричних колах з одним накопичувачем енергії; визначення впливу параметрів досліджуваного кола на характер перехідного процесу.

#### 11.1 Основні теоретичні відомості

Разом із усталеними режимами роботи в електричних колах мають місце електромагнітні перехідні процеси, які виникають у разі переходу кола з одного усталеного режиму в інший, наприклад під час розмикання або замикання кола, а також в результаті зміни одного або декількох параметрів. Будь-яка зміна стану електричного кола, яка спричинила перехідний процес – називається комутацією.

Перехідні процеси тривають певний час. Вони не є миттєвими, оскільки в усталеному режимі елементи кола містять певний запас енергії електричного та магнітного полів. Тому в електричних колах струми та напруги не можуть миттєво змінюватись. Якщо знехтувати електричним або магнітним полем на тій чи іншій ділянці електричного кола, то можна вважати, що струм та напруга на цій ділянці змінюються миттєво. У відповідності з першим законом комутації електричних кіл струм в котушці індуктивності не може змінюватись миттєво. Однак, якщо знехтувати електричною ємністю, то можна вважати, що напруга на кінцях котушки може змінюватись миттєво. У відповідності з другим законом комутації напруга на обкладинках конденсатора не може змінюватись миттєво. Однак, якщо знехтувати індуктивністю конденсаторів, то теоретично можлива миттєва зміна струму.



Перехідні процеси в лінійних електричних колах описуються лінійними диференційними рівняннями, складеними за першим та другим законами Кірхгофа, що зводяться до одного рівняння для будь-якого струму або напруги в колі.

Рішення неоднорідного диференційного рівняння класичним методом складається з суми часткового рішення даного рівняння та його загального рішення, тобто однорідного диференційного рівняння. Рішення однорідного рівняння без вільного члена описує процеси в електричному колі за відсутності зовнішніх джерел живлення, тобто процеси, що виникають під дією енергії, що накопичена в електричному та магнітному полях елементів.

В реальних електричних колах енергія розсіюється, в результаті чого запас накопиченої на відповідних елементах кола енергії з часом буде вичерпано і, тому через певний час усі електромагнітні процеси в колі завершаться. З урахуванням вище наведеного можна стверджувати, що вільні складові струму  $i''$  та напруги  $u''$ , які є загальним рішенням однорідного диференційного рівняння, наближаються до нуля.

Частковим рішенням неоднорідного диференційного рівняння є вимушені або усталені складові струму  $i'$  та напруги  $u'$ , які мають місце в усталеному режимі, тобто після завершення перехідного процесу.

Перехідний процес в електричному колі можна подати як суму вимушеної та вільної складових:

$$u = u' + u'', \quad i = i' + i''.$$

Під час інтегрування диференційних рівнянь виникають сталі інтегрування, кількість яких визначається порядком відповідного рівняння. Сталі інтегрування визначаються з початкових умов, які характеризують стан електричного кола в певний момент часу. Кількість початкових умов дорівнює кількості сталих інтегрування.

Розглянемо перехідний процес в RL колі (рис. 11.1), якщо його підключити до джерела постійної напруги. В разі замикання ключа перехідний

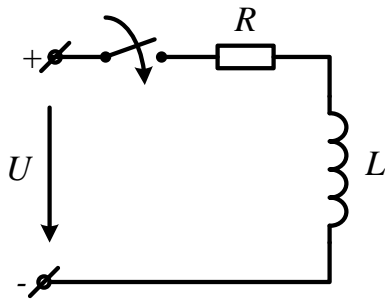


Рис. 11.1

процес описується диференціальним рівнянням, складеним за другим законом Кірхгофа

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = U.$$

Даному диференційному рівнянню відповідає алгебраїчне

$$R + Lp = 0,$$

де  $p = -\frac{R}{L}$  - корінь характеристичного рівняння.

Тоді вільна складова струму перехідного процесу має вигляд:

$$i''(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Оскільки дане коло підключено до джерела постійної напруги, то вимушена складова струму в перехідному режимі дорівнює його усталеному значенню:

$$i = \frac{U}{R}.$$

Тоді струм перехідного режиму дорівнює

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Стала інтегрування  $A$  визначається з початкових умов. Оскільки струм в колі з індуктивністю стрибком змінитися не може, то в початковий момент часу

( $t=0$ ) струм в колі відсутній:  $i(0) = \frac{U}{R} + A = 0$ . Звідки  $A = -\frac{U}{R}$ . Тоді вільна

складова дорівнює  $i''(t) = -\frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t}$ . Остаточний вираз для струму перехідного процесу набуває вигляду:

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де  $\tau = \frac{L}{R}$  - стала часу електричного кола, яка дорівнює проміжку часу, по закінченню якого вільна складова струму змінюється в  $e$  раз по відношенню до свого вихідного значення.

Напруга на індуктивності перехідного процесу визначається з рівняння:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{d \left[ \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]}{dt} = L \cdot \frac{U}{R\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

На рис. 11.2 подано часові залежності струму та напруги на індуктивності в перехідному режимі. Під час перехідного процесу струм в колі збільшується від нуля, асимптотично наближуючись до свого усталеного значення  $\frac{U}{R}$ , а напруга на індуктивності, яка дорівнює  $U$ , коли  $t = 0$ , спадає, асимптотично наближуючись до нуля. Стала часу може бути визначена графічно, як довжина піддотичної, що проведена в будь-якій точці до кривої, що відповідає показовій

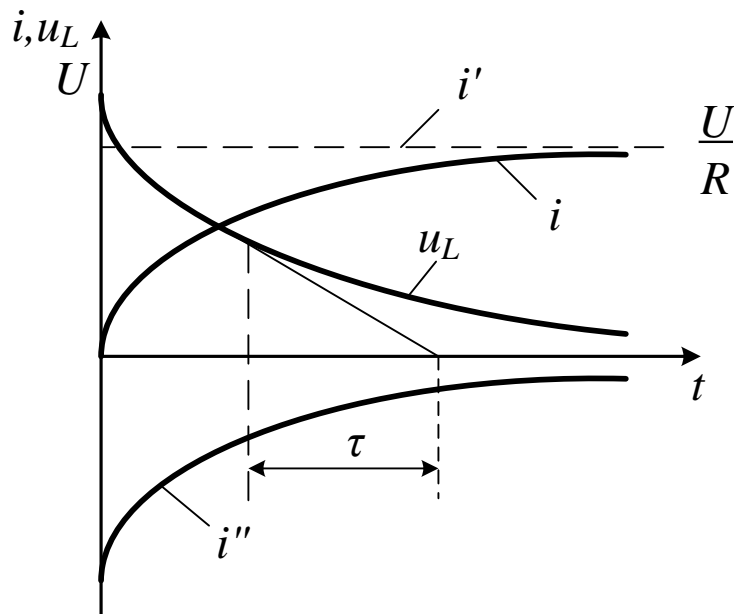


Рис. 11.2

функції часу, що розглядається.

Якщо  $RL$  коло, підключене до джерела постійної напруги, замкнути накоротко, то в колі виникне перехідний процес, обумовлений запасом енергії в магнітному полі котушки індуктивності  $L$ . Він буде характеризуватись тільки вільною складовою струму, вимушена складова відсутня ( $i' = 0$ ). В цьому випадку рівняння перехідного процесу має вигляд:

$$i(t) = i''(t) = Ae^{-\frac{R}{L}t} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Сталу інтегрування визначають з умови, що до короткого замикання струм в колі дорівнював

$$i(0) = I = \frac{U}{R} = A.$$

З урахуванням наведеного струм перехідного процесу

$$i(t) = i''(t) = \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

З часової залежності струму в перехідному процесі (рис. 11.3) випливає, що струм в електричному колі зменшується за експоненціальним законом від значення  $\frac{U}{R}$  в момент короткого замикання до нуля.

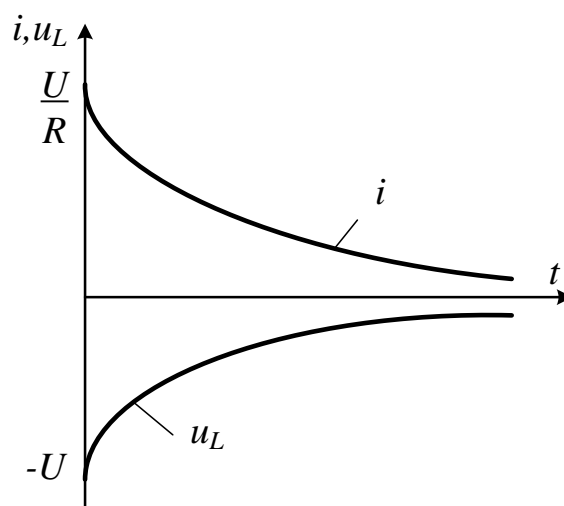


Рис. 11.3

Аналогічно змінюється в даному колі і напруга на індуктивності

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{d \left[ \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \right]}{dt} = -L \cdot \frac{U}{R\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

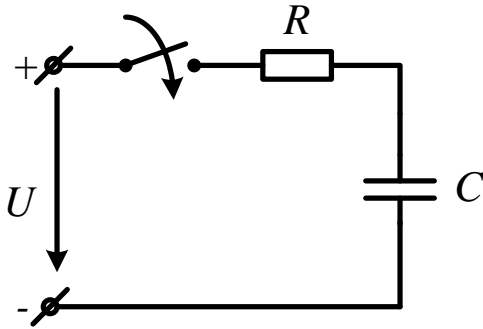


Рис. 11.4

Розглянемо перехідний процес в RC колі (рис. 11.4), в разі його підключення до джерела постійної напруги. Будемо вважати, що до моменту включення конденсатор був розряджений. Виходячи із рівняння електричної рівноваги для миттєвих значень, складеного за другим законом Кірхгофа, коли  $t \geq 0$ , будемо мати

$$Ri + u_C = U.$$

Струм в даному колі визначається через ємність конденсатора  $C$  та зміну напруги на його обкладинках:  $i = C \frac{du_C}{dt}$ . Тоді диференціальне рівняння кола буде мати такий вигляд

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Даному диференційному рівнянню відповідає характеристичне

$$RCp + 1 = 0,$$

де  $p = -\frac{1}{RC}$  - корінь характеристичного рівняння.

Рішення однорідного диференційного рівняння дає вільну складову напруги на конденсаторі перехідного процесу  $u_C''(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{RC}}$ . В усталеному режимі струм в колі відсутній  $i(t) = 0$ , тому  $u_C'(t) = U$ . Напруга на конденсаторі під час перехідного процесу

$$u_C(t) = u_C'(t) + u_C''(t) = U + Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Стала інтегрування  $A$  визначається з початкових умов. До замикання ключа конденсатор був розряджений і напруга на його обкладинках дорівнювала нулю  $u_C(0) = 0$ . Тоді  $u_C(0) = U + A = 0$ , звідки  $A = -U$  та  $u_C''(t) = -Ue^{-\frac{t}{RC}}$ . Таким чином, часова залежність напруги на обкладках конденсатора під час перехідного процесу визначається рівнянням

$$u_C(t) = u_C'(t) + u_C''(t) = U - Ue^{-\frac{t}{RC}} = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де  $\tau = RC$  – стала часу електричного кола, яка дорівнює часу, через який напруга в колі змінюється в  $e$  раз по відношенню до свого вихідного значення. Струм в колі під час перехідного процесу

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(u_C' + u_C'')}{dt} = 0 + \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Аналіз часових залежностей напруги на конденсаторі та струму в  $RC$  колі під час перехідного процесу (рис. 11.5) показує, що з часом напруга на конденсаторі зростає, наближаючись до свого усталеного значення  $U$ , а струм

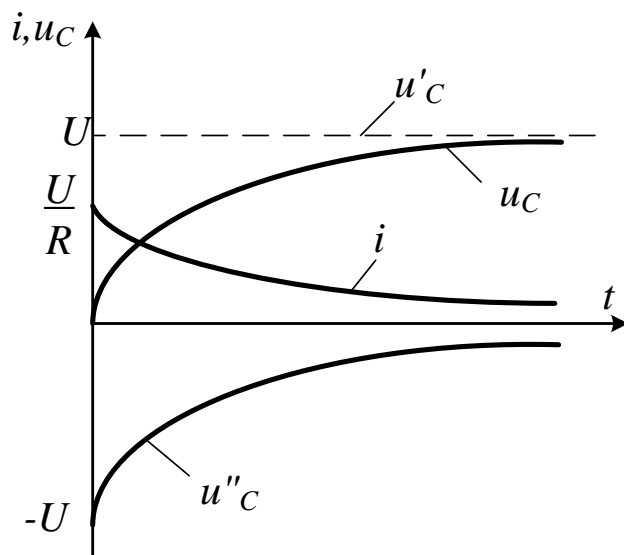


Рис. 11.5

зменшується від значення  $\frac{U}{R}$  до нуля. В такому випадку напруга на конденсаторі та струм в колі змінюються тим швидше, чим менша стала часу.

Якщо  $RC$  коло, яке знаходилося під дією постійної напруги, замкнути накоротко, то електромагнітні процеси в ньому будуть спричинені енергією, накопиченою в електричному полі

конденсатора. Ця енергія, що дорівнює  $\frac{1}{2}CU^2$ , під час перехідного процесу перетворюється на тепло, яке розсіюється в резисторі  $R$ . Усталені значення струму в  $RC$  колі та напруги на обкладках конденсатора будуть дорівнювати нулю:  $i'(t) = 0$ ,  $u'_C(t) = 0$ , а відповідні вільні складові будуть такими:

$$i''(t) = -\frac{A}{R}e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u''_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Струм в колі та напруга на конденсаторі в перехідному режимі в результаті короткого замикання описуються рівняннями:

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = -\frac{A}{R}e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u_C(t) = u'_C(t) + u''_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Стала інтегрування визначається з початкових умов. Оскільки до комутації конденсатор був заряджений до напруги  $U$ , то  $u_C(0) = U = A$ . Остаточно маємо перехідні значення струму та напруги на конденсаторі:

$$i(t) = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad u_C(t) = Ue^{-\frac{t}{RC}} = Ue^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Часові залежності для струму та напруги на конденсаторі під час перехідного процесу подано на рис. 11.6, з якого видно, що напруга та струм в разі короткого замикання  $RC$  кола спадають за експоненціальним законом у відповідності із сталою часу  $\tau = RC$ .

## 11.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою (схема рис. 11.10) та приладами, які використовуються у лабораторній роботі.
2. На звуковому генераторі встановити режим генерування прямокутного сигналу з частотою 1000 Гц.
3. Дослідити перехідні процеси в колі з резистором та конденсатором:

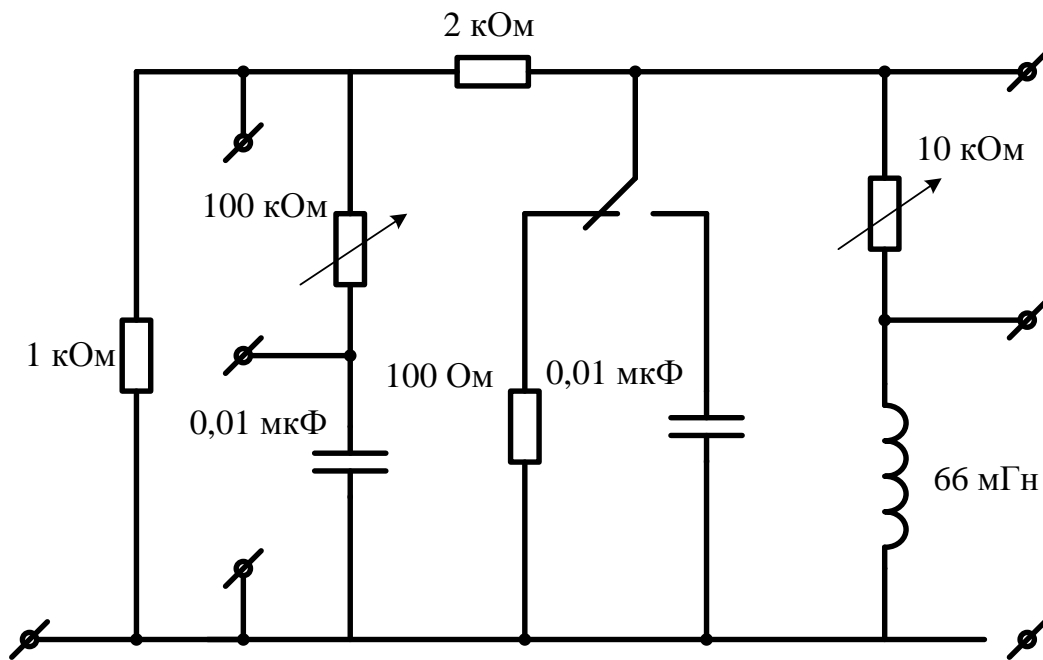


Рис. 11.10

а) підключити звуковий генератор до RC кола, а вхід осцилографа підключити до конденсатора (рис. 11.11);

б) для трьох значень опору змінного резистору ( $R = 13, 50$  та  $100 \text{ Ом}$ ) зняти на кальку осцилограми напруги на конденсаторі. Встановити значення опору змінного резистору за допомогою приладу В7-22А.

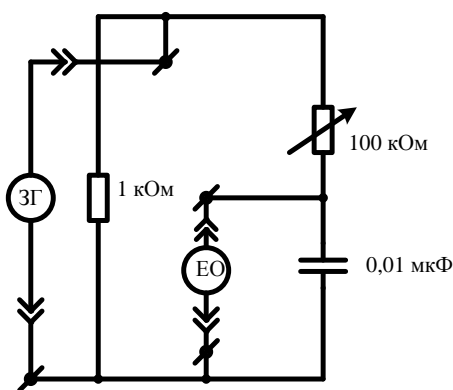


Рис. 11.11

4. Дослідити перехідні процеси в електричному колі з резистором та котушкою індуктивності:

а) підключити звуковий генератор до RL кола, а вхід осцилографа підключити до котушки індуктивності (рис. 11.12);

б) зняти осцилограми напруги на котушці індуктивності для трьох значень опору змінного резистору ( $R = 0,1 \text{ кОм}$ ;



0,09 кОм; 0,05 кОм). Встановити значення опору змінного резистору за допомогою приладу В7-22А.

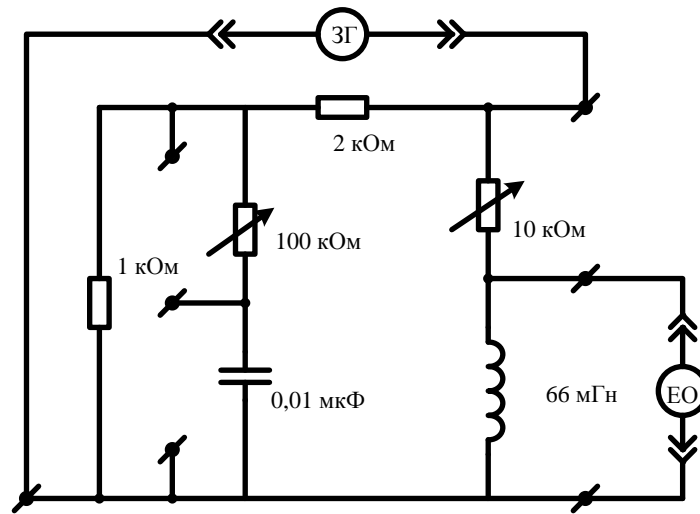


Рис. 11.12

### 11.3 Опрацювання результатів досліджень

3. За осцилограмами  $u_C(t)$  досліду п.3 визначити сталі часу та порівняти їх з відповідними значеннями, розрахованими за числовими значеннями параметрів елементів кола. Результати занести у таблицю 11.1.

Таблиця 11.1

Тип кола	Опір кола	Стала часу	
		Експериментальна	Теоретична
<b><i>RC</i></b>	$R =$		
	$R =$		
	$R =$		
<b><i>RL</i></b>	$R =$		
	$R =$		
	$R =$		

4. За осцилограмами  $u_L(t)$  досліду п.4 визначити сталі часу досліджуваних  $RL$  кіл та порівняти їх з відповідними розрахованими значеннями. Результати занести у таблицю 11.1.

### 11.4 Контрольні питання

1. Дати визначення усталеного та перехідного процесу в електричному колі.
2. Дати визначення законів комутації.
3. Що таке стала часу електричного кола?
4. Як визначити сталу часу за експериментальними залежностями струму або напруги перехідного процесу?
5. Як визначити ємність конденсатора або опір резистора, на який розряджається конденсатор, за кривою його розрядки, якщо одне з них відомо?
6. Записати рівняння перехідної напруги на конденсаторі в разі підключення  $RC$  кола до джерела постійної напруги.
7. Записати рівняння перехідного струму в разі підключення  $RL$  кола до джерела постійної напруги.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12

### ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО КОЛА З ПОСЛІДОВНИМ, ПАРАЛЕЛЬНИМ ТА МІШАНИМ З'ЄДНАННЯМ

**Мета роботи:** ознайомитися з нелінійними елементами різних типів; навчитися знімати і будувати їх вольт-амперні характеристики; експериментально перевірити графічний метод розрахунку простого нелінійного кола.

#### 12.1 Основні теоретичні положення

До складу електричних кіл часто входять такі елементи, в яких струм не пропорційний напрузі, тобто для таких елементів закон Ома не виконується. Такі кола називають нелінійними.

Для розрахунку нелінійних кіл, а також для визначення характеру нелінійності користуються вольт-амперними характеристиками (ВАХ).

Вольт-амперною характеристикою називають залежність струму, який проходить через опір, від напруги на цьому опорі:  $U = f(I)$ . Цю залежність визначають експериментально за допомогою амперметра та вольтметра або обчислюють аналітично. Вольт-амперні характеристики зображують у вигляді графіків.

Елементи, вольт-амперні характеристики яких є прямими лініями, називають лінійними, а електричні кола, які містять лінійні елементи, називають лінійними електричними колами. Елементи називають нелінійними, коли їх вольт-амперні характеристики не є прямими (рис. 12.1). Коло, до складу якого входить хоча б один нелінійний елемент, називають нелінійним. На рис. 12.1. показані приклади вольт-амперних характеристик деяких елементів кола.

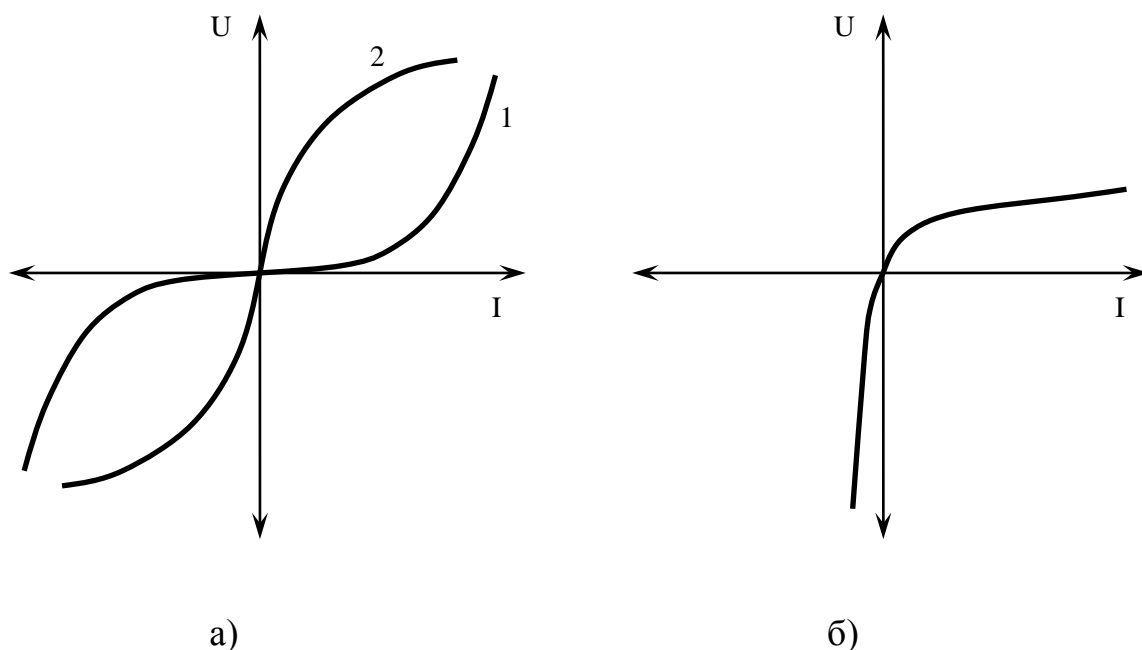


Рис.12.1.

Вольт-амперні характеристики типу 1 (рис. 12.1,а) мають лампи розжарювання з металевою ниткою. Із збільшенням струму нитка лампи розжарюється сильніше і її опір та напруга збільшуються. Вольт-амперна характеристика типу 2 (рис. 12.1,а) властива лампі з вугільним волоском. Вольт-амперна характеристика, зображена на рис. 12.1,б властива деяким напівпровідниковим випрямлячам.

Властивості нелінійного елемента можуть бути охарактеризовані або його ВАХ або його статичним чи динамічним опорами. Статичний опір  $R_{cm}$  характеризує поведінку нелінійного елемента в режимі незмінного струму. Він дорівнює відношенню напруги на нелінійному елементі до струму, який протікає через цей елемент:  $R_{cm} = U/I$ . На рис. 12.2 показана ВАХ нелінійного елемента, побудована в масштабах для струму  $m_i$  та для напруги  $m_u$ . Припустимо, що робочий режим елемента заданий точкою А. Відношення напруги, що визначається відрізком АВ, до струму, який визначається відрізком ОВ, визначає в деякому масштабі  $m_{cm} = m_u/m_i$  статичний опір  $R_{cm}$  в точці А. З

рис. 12.2 видно, що статичний опір чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямої, яка проведена з початку координат у робочу точку характеристики, який помножений на відношення масштабів по вісям:

$$R_{cm} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha.$$

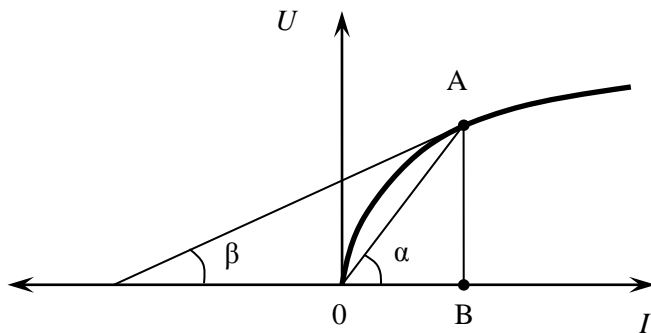


Рис. 12.2

Під диференціальним опором  $R_{дин}$  розуміють відношення малого (теоретично нескінченно малого) приросту напруги  $dU$  на нелінійному елементі до відповідного приросту струму  $dI$ :  $R_{дин} = dU/dI$ .  $R_{дин}$  чисельно дорівнює тангенсу кута  $\beta$  нахилу дотичної до

ВАХ в робочій точці, помноженому на відношення масштабів по вісям:

$$R_{дин} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \beta.$$

Диференціальний опір характеризує поведінку нелінійного опору при досить малих відхиленнях від попереднього стану.

У нелінійному електричному колі, так як і в лінійному, усі процеси описуються за допомогою першого та другого законів Кірхгофа. Відповідно і правила складання цих рівнянь однакові для лінійних та нелінійних електричних кіл. Проте у випадку нелінійних кіл рівняння є нелінійними і методи їх розрахунку мають свою специфіку. Для аналітичного розв'язання необхідне аналітичне завдання характеристик усіх нелінійних елементів кола. Аналітичний розв'язок навіть для невеликої кількості у колі нелінійних елементів є досить складним; у загальному випадку він можливий за допомогою чисельних методів, які дають приблизний результат. До того ж ,

аналітичний розрахунок нелінійних кіл ускладнюється тим, що закон Ома, який зумовлює пропорційність між струмом і напругою (лінійність) у нелінійних колах не діє. Тому на практиці застосовують графічні та графоаналітичні методи розрахунку нелінійних кіл, в яких використовуються ВАХ нелінійних елементів, одержаних в ході експерименту, і заданих у вигляді графіків або таблиць. Графіки повинні бути виконані так, щоб вони задовольняли основним рівнянням кола. Наприклад, для послідовного з'єднання трьох опорів  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ , вольт-амперні характеристики яких показані на рис. 12.3, можна записати:

$$I = I_1 = I_2 = I_3, \quad U = U_1 + U_2 + U_3,$$

де  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  – струм, що проходить через опори  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ ,  $I$  – загальний струм,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  – напруга відповідно на опорах  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ ,  $U$  – загальна напруга.

Цим рівнянням відповідають графіки на рис. 12.3, які придатні для графічних розрахунків з метою визначення струмів і напруг на різних опорах при різних напругах  $U$ .

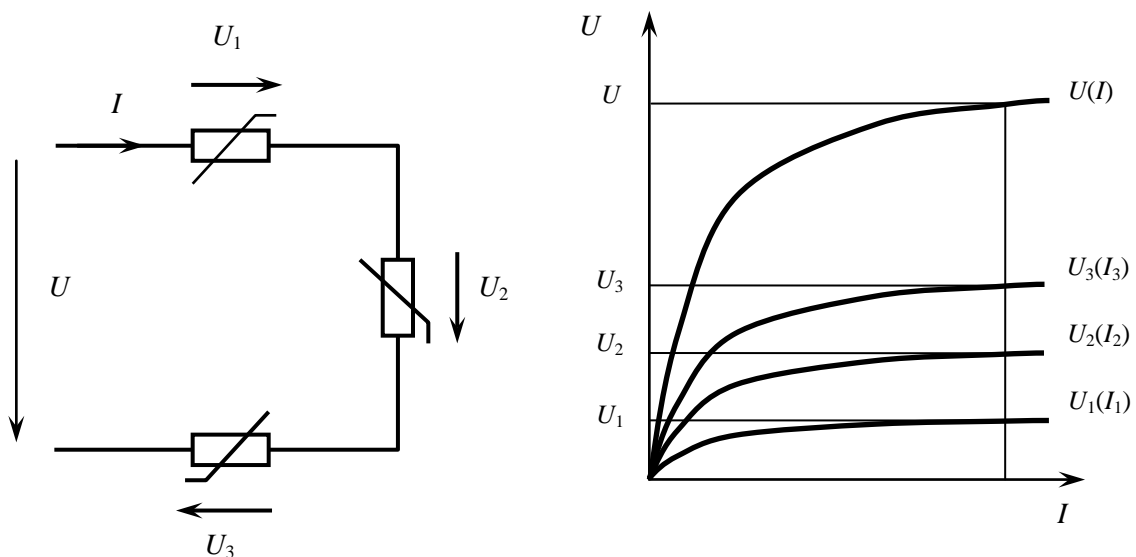


Рис.12.3

Отже, при послідовному з'єднанні результуючу вольт-амперну характеристику всього кола знаходять складанням напруг-абсцис

характеристик окремих опорів. За допомогою такої побудови можна знайти напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  і струм  $I$  при загальній напрузі  $U$ .

Для паралельного з'єднання тих самих опорів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (рис.12.4) можна

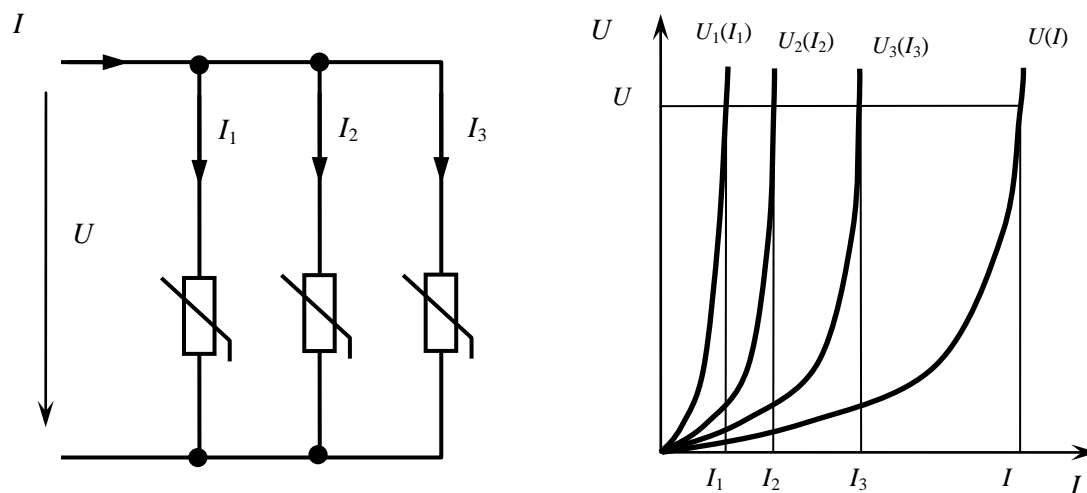


Рис. 12.4

записати:  $U = U_1 = U_2 = U_3$ ,  $I = I_1 + I_2 + I_3$

Отже, при паралельному з'єднанні результуючу вольт-амперну характеристику всього кола знаходять складанням струмів-ординат характеристик окремих опорів. За допомогою такої побудови можна обчислити струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  при заданій напрузі  $U$ .

Для змішаного з'єднання цих опорів (опори  $R_2$  і  $R_3$  з'єднані паралельно,  $R_1$  приєднано до них послідовно) спочатку знаходять результуючу вольт-амперну характеристику паралельно з'єднаних елементів, а потім розглядають коло як послідовне (рис.12.5).

Струми і напруги в такому колі при заданій вхідній напрузі  $U$  розраховують таким чином. По вісі  $U$  відкладають значення вхідної напруги  $U$  і через цю точку проводять пряму, паралельну вісі  $I$ , до перетину з ВАХ усього кола  $U(I)$  у точці  $m$ . Через точку  $m$  проводять пряму паралельну вісі  $U$ .

Ордината точки перетину  $k$  цієї прямої з ВАХ першого елементу  $U_1(I_1)$  дорівнює у масштабі напруг значенню  $U_1$ . Ордината точки перетину  $n$  цієї прямої з результуючою ВАХ паралельної ділянки  $U_{23}(I)$  дорівнює у масштабі напруг значенню напруги на паралельній ділянці  $U_{23}$ .

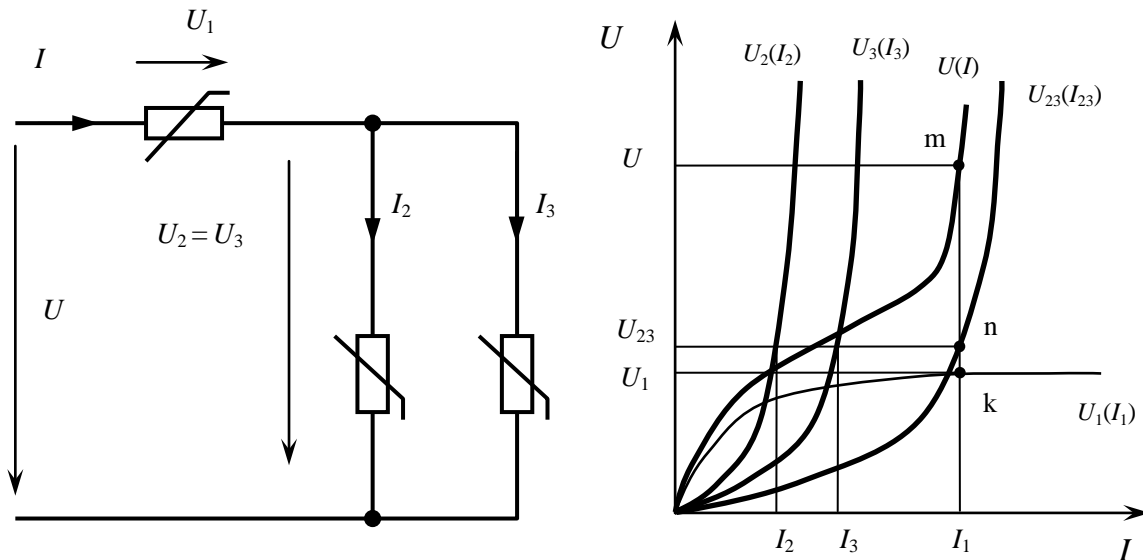


Рис. 12.5

На осі  $I$  ця пряма покаже значення струму у нерозгалуженій частині кола  $I_1$ . Знаючи напругу на паралельній ділянці, визначити струми  $I_2$  і  $I_3$  неважко, для чого через точку  $n$  слід провести пряму, паралельну вісі струмів  $I$ . Абсциси точок перетину цієї прямої з ВАХ  $U_2(I_2)$  і  $U_3(I_3)$  у масштабі струмів дорівнюють відповідно  $I_2$  і  $I_3$ .

## 12.2 Порядок виконання роботи

1 Зняти вольт-амперну характеристику трьох елементів:

1.1 скласти коло, показане на рис.12.6;

1.2 поступово збільшуючи напругу джерела живлення від нуля до значення вказаного викладачем, записати у табл.12.1 значення струму і напруги на елементі, що досліджується.



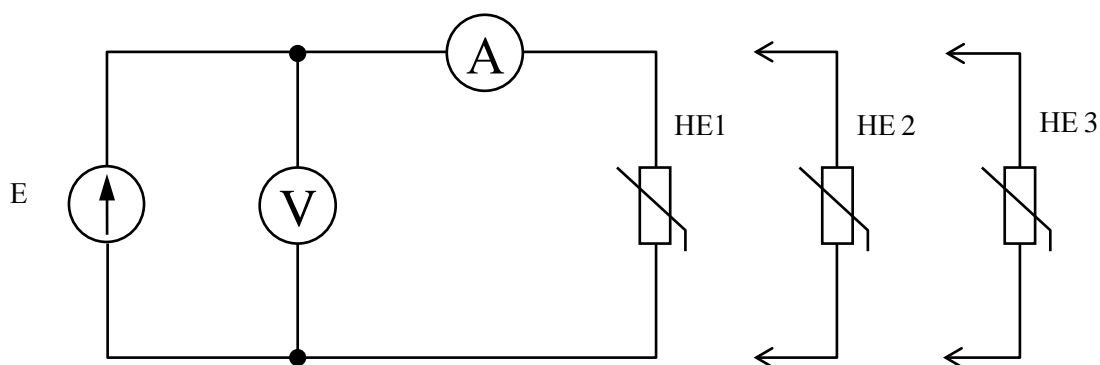


Рис. 12.6

Таблиця 12.1

№	HE1		HE2		HE3	
	$U$	$I$	$U$	$I$	$U$	$I$
	В	mA	В	mA	В	mA
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

2 Дослідити послідовне з'єднання нелінійних елементів:

2.1 скласти коло, показане на рис.12.7;

2.2 встановити на вході кола значення напруги, яке вказане викладачем;

2.3 виміряти струм у колі і напругу на кожному елементі;

2.4 перевірити правильність вимірювань за другим законом Кірхгофа:

$$U = U_1 + U_2 + U_3;$$

2.5 дані вимірювань занести у табл. 12.2.

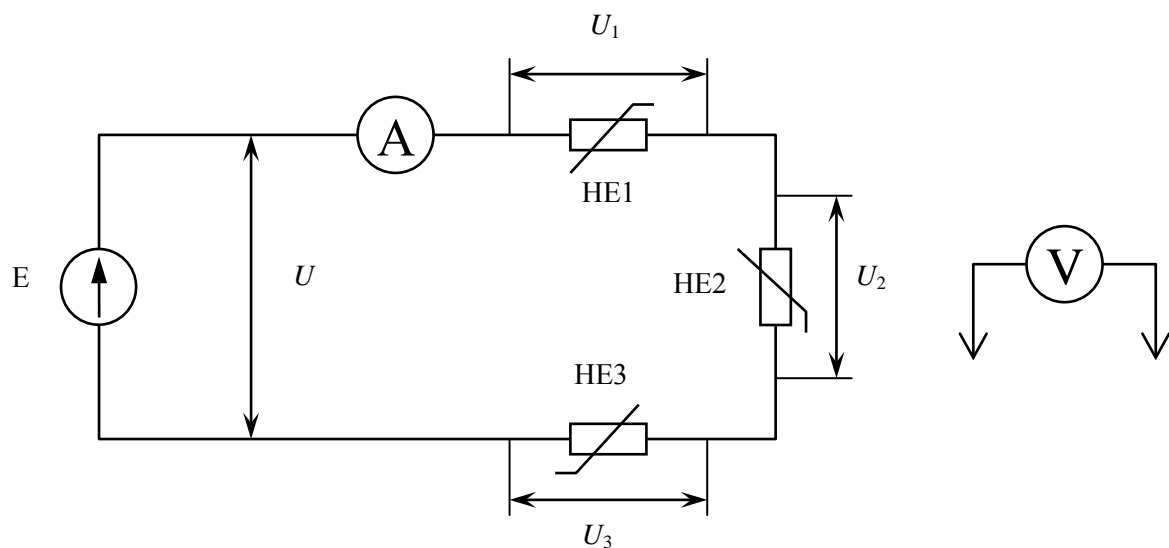


Рис. 12.7

Таблиця 12.2.

Дані вимірювань					Результати обчислень						
$U$	$I$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$R$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
В	мА	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт

3 Дослідити паралельне з'єднання нелінійних елементів:

3.1 скласти схему, зображену на рис.12.8;

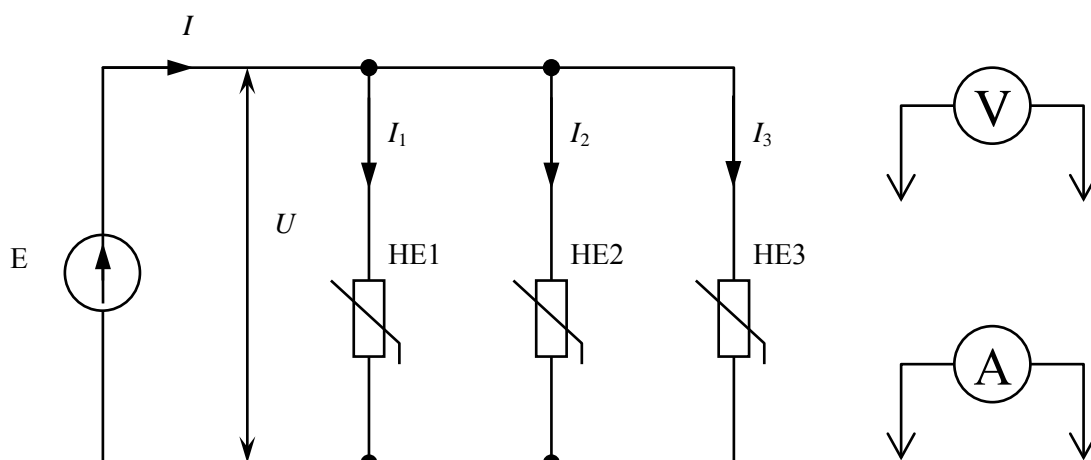


Рис. 12.8

- 3.2 встановити напругу на вході кола за вказівкою викладача;
- 3.3 виконати вимірювання у відповідності до табл.12.3;
- 3.4 перевірити правильність вимірювань за першим законом Кірхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Таблиця 12.3.

Дані вимірювань					Результати обчислень			
$U=U_1=U_2=U_3$	$I$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$R$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
В	мА	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Ом

4 Дослідити коло із змішаним з'єднанням елементів:

- 4.1 скласти коло, зображене на рис.12.9;
- 4.2 встановити напругу на вході кола, вказану викладачем;
- 4.3 виміряти струми та напруги у відповідності з табл.12.4;
- 4.4. перевірити правильність вимірювань за першим та другим законами

Кірхгофа:

$$I = I_1 = I_2 + I_3, \quad U = U_1 + U_2 = U_1 + U_3.$$

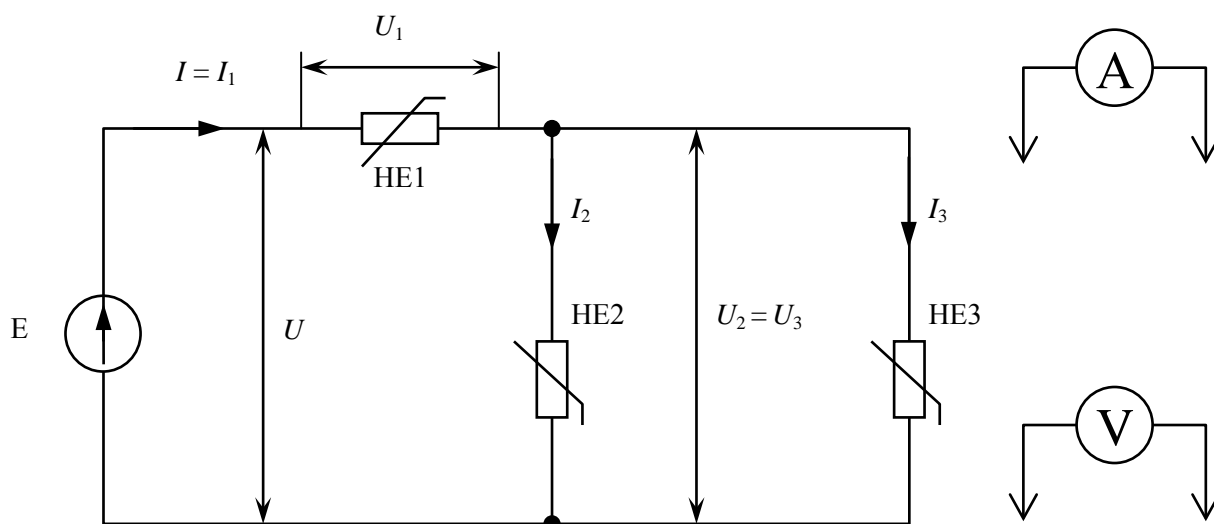


Рис. 12.9

Таблиця 12.4.

Дані вимірювань						Результати обчислень			
$U$	$U_1$	$U_2 = U_3$	$I = I_1$	$I_2$	$I_3$	$R$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
В	В	В	мА	мА	мА	Ом	Ом	Ом	Ом

### 12.3 Опрацювання результатів досліджень

1. За даними таблиць 12.2-12.4 виконати необхідні обчислення.
2. Користуючись даними табл. 12.1, у загальних координатних осях побудувати вольт-амперні характеристики для всіх трьох елементів.
3. По ВАХ окремих елементів побудувати результуючі ВАХ для послідовного, паралельного та змішаного з'єднань цих трьох елементів.
4. Визначити струми та напруги окремих елементів для різних з'єднань, використовуючи побудови, виконані в п.3. Порівняти отримані дані з результатами експерименту.
5. Зробити висновки по роботі.

### 12.4 Контрольні питання

1. Чим відрізняється нелінійне коло від лінійного?
2. Що таке вольт-амперна характеристика та що вона характеризує?
3. Що таке статичний та динамічний опір нелінійного елементу? Як визначаються ці опори?
4. Які паспортні величини зазначені на лампі розжарювання та як знайти її опір за паспортними даними?
5. Дві лампи потужність 60 та 100 Вт з'єднані послідовно. Яка з ламп горить яскравіше, якщо номінальна напруга ламп однакова?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

### ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

**Мета роботи:** дослідити котушку індуктивності з магнітопроводом, що має повітряний зазор; дослідити вплив магнітопроводу на властивості котушки в колах постійного та змінного струмів; за експериментальними даними визначити параметри котушки.

#### 13.1 Основні теоретичні відомості

Котушка індуктивності є основним елементом різних електричних машин та апаратів, пристроїв електроавтоматики, промислової електроніки, обчислювальної техніки та ін.

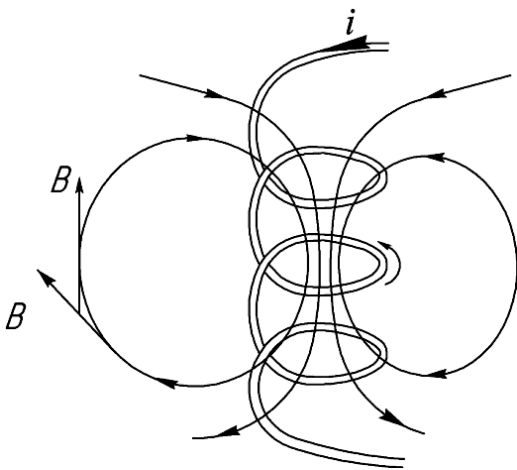


Рис. 13.1

Якщо через витки  $W$  котушки проходить електричний струм  $i$ , то в оточуючому середовищі утворюється магнітне поле (рис. 13.1), яке характеризується такими векторними величинами: магнітною індукцією  $\vec{B}$ , напруженістю магнітного поля  $\vec{H}$ , магнітним потоком  $\vec{\Phi}$ , намагніченістю речовини  $\vec{M}$ .

Характеристики магнітного поля пов'язані співвідношеннями:

$$\vec{\Phi} = \oint_S \vec{B} d\vec{S}, \quad \vec{B} = \mu_a \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M},$$

де  $\mu_a$  – абсолютна проникність речовини,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнітна стала,  $\mu_r = \mu_a / \mu_0$  – відносна проникність речовини.

Зв'язок між струмом  $i$  у котушці та характеристиками магнітного поля встановлюють формули:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = Wi, \quad \oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 Wi, \quad W\Phi = Li$$

Лінійний інтеграл  $\oint_l \vec{H} d\vec{l} = Wi = F$  – розглядають як причину існування магнітного поля і називають магніторушійною або намагнічу вальною силою по аналогії з електрорушійною силою в електричних колах. Добуток  $W\Phi = \psi$  називають потокозчепленням, а коефіцієнт пропорційності  $L = \psi / i$  – індуктивністю котушки.

За відсутності осердя намагніченість повітря  $M \approx 0$ , тому  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  потокозчеплення  $W$  пропорційнет струму в котушці  $i$ , відповідно  $L = \psi / i = \text{const}$ . Отже, у такому випадку котушка являє собою лінійний елемент.

За наявності феромагнітного осердя магнітний потік, що утворюється котушкою за тих самих умов, суттєво зростає, оскільки він утворюється не тільки струмом котушки, але й молекулярними струмами феромагнітної речовини. Саме тому для створення потрібного магнітного потоку за меншого струму в багатьох електротехнічних пристроях використовують котушки з феромагнітним осердям. Через молекулярні струми в осерді порушується пряма пропорційна залежність між потокозчепленням  $\psi$  та струмом котушки  $i$ , тому  $L \neq \text{const}$ . Кожній точці магнітної характеристики  $\psi = f(i)$  тепер притаманна своя динамічна індуктивність  $L = d\psi / di$ . Отже, за наявності осердя котушка індуктивності стає нелінійним елементом і набуває нових властивостей.

Якщо котушка живиться змінним струмом, то внаслідок циклічної зміни магнітного потоку феромагнітне осердя перемагнічується за петлею гістерезису

з частотою струму. На циклічне перемагнічування осердя витрачається потужність, що виділяється в ньому у вигляді теплоти. Ці втрати потужності, що називаються втратами на гістерезис, пропорційні площі петлі гістерезису (рис. 13.2) і розраховуються за формулою

$$P_{\Gamma} = K_1 f B_m^n G,$$

де  $K_1$  - коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу феромагнітного осердя;

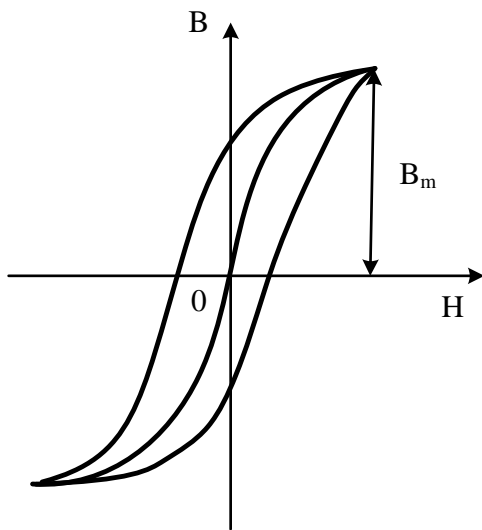


Рис. 13.2

$f$  – частота струму;

$B_m$  – амплітуда магнітної індукції;

$n$  – показник ступеню ( $n=1.6$  за  $B_m < 1$  Тл та  $n=2$  за  $B_m > 1$  Тл);

$G$  - маса осердя.

Змінний магнітний потік наводить в осерді вихрові струми, які також призводять до втрати потужності, що розраховується по формулі:

$$P_B = K_2 f^2 B_m^2 \gamma G,$$

де  $K_2$  - коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу та конструкції феромагнітного осердя;  $\gamma$  - питома провідність матеріалу осердя.

Наявність втрат потужності на гістерезис та вихрові струми, які разом називають втратами в сталі ( $P_C = P_{\Gamma} + P_B$ ) – особливість котушки з феромагнітним осердям в колах змінного струму.

Для зменшення втрат потужності на гістерезис осердя котушки виготовляють з феромагнітних матеріалів, які мають вузьку петлю гістерезису. Зменшення втрат потужності на вихрові струми досягається шляхом застосування для осердя матеріалів з великим питомим опором. В цьому випадку магнітопровід збирають з окремих ізольованих один від одного листів

електротехнічної сталі, що призводить до зменшення наведених в кожній пластині вихрових струмів  $i$ , відповідно, до зменшення втрат потужності.

Втрати потужності в активному опорі  $R$  провідників котушки називають втратами в міді  $P_M$ , оскільки котушки виготовляють переважно з мідного проводу.

Проаналізуємо електромагнітні процеси у котушці при підключенні її до джерела синусоїдної напруги (рис. 13.3).

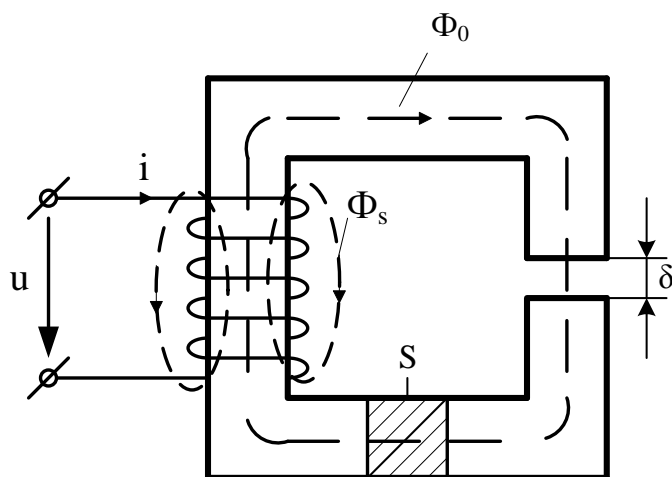


Рис. 13.3

Синусоїдна напруга  $u$  створює у котушці змінний струм  $i$ , що призводить до появи змінної магніторушійної сили (МРС)  $F = Wi$ , яка у свою чергу, збуджує магнітний потік  $\Phi$ . Більша частина потоку  $\Phi$  замикається по феромагнітному осерддю,

оскільки його магнітна проникність  $\mu = (10^4 - 10^5)\mu_0$ . Цю частину магнітного потоку називають основним або робочим потоком та позначають  $\Phi_0$ . Менша частина потоку  $\Phi$  (приблизно 3-5%) замикається навколо витків котушки по повітрю і називається магнітним потоком розсіювання  $\Phi_\sigma$ . Зчіплюючись з витками котушки, магнітні потоки  $\Phi_0$  та  $\Phi_\sigma$  утворюють відповідно робоче потокозчеплення  $\psi_0 = W\Phi_0$  та потокозчеплення розсіювання  $\psi_\sigma = W\Phi_\sigma$ .

Згідно з законом електромагнітної індукції магнітні потоки  $\Phi_0$  та  $\Phi_\sigma$  індукують у котушці ЕРС самоіндукції:

$$e_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} \quad \text{та} \quad e_\sigma = -\frac{d\psi_\sigma}{dt}.$$



Дію  $\psi_0$  та  $\psi_\sigma$  розглядають окремо по такій причині. Потокозчеплення

$\psi_0 = W\Phi_0$  нелінійно зв'язано зі струмом  $i$ , тому  $L_0 = -\frac{d\psi_0}{di} \neq \text{const}$ .

Потокозчеплення  $\psi_\sigma = W\Phi_\sigma$  пропорційне струму  $\psi_\sigma = L_\sigma i$ , оскільки магнітний опір повітря, по якому замикаються лінії  $\Phi_\sigma$ , можна вважати незмінним, і відповідно  $L_\sigma = \text{const}$ .

За другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги для котушки з феромагнітним осердям записується таким чином

$$u = -e_0 + Ri + L_\sigma \frac{di}{dt}. \quad (13.1)$$

Властивість котушки з феромагнітним осердям, як нелінійного елемента, проявляється в тому, що прикладена до котушки синусоїдна напруга викликає несинусоїдний струм. З метою спрощення розрахунків та уявлення про фізичні процеси в котушці, дійсний несинусоїдний струм замінюють еквівалентним

синусоїдним. Це дозволяє записати рівняння електричної рівноваги в комплексній формі, побудувати векторну діаграму, скласти схему заміщення котушки та визначити її еквівалентні параметри.

Запишемо рівняння електричної рівноваги котушки з феромагнітним осердям (13.1) в комплексній формі:

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + \dot{I}(R + jX_\sigma). \quad (13.2)$$

Векторну діаграму, що відповідає рівнянню (13.2) показано на рис. 13.4, а еквівалентну схему заміщення – на рис. 13.5.

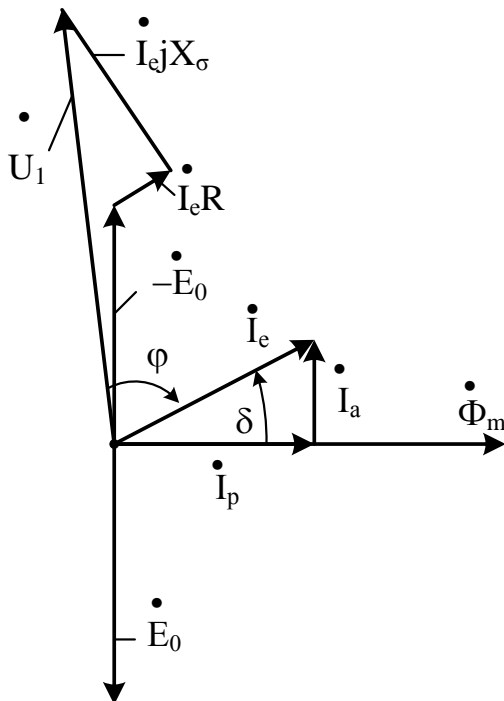


Рис. 13.4

На малюнках:  $R$  – активний опір, яким враховують втрати потужності в провідниках (втрати в міді);  $X_\sigma = \omega L_\sigma$  – індуктивний опір, яким враховують потік розсіювання;  $G_0$  – активна провідність, що враховує втрати потужності на гістерезис та вихрові струми;  $B_0$  – реактивна провідність, що враховує основний магнітний потік.

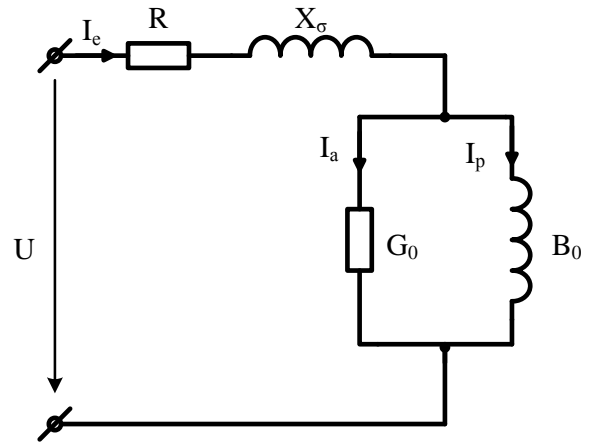


Рис. 13.5

На векторній діаграмі кут  $\delta$  – кут між вектором струму  $I_e$  та вектором основного магнітного потоку  $\Phi_m$ , який називають кутом магнітних втрат або кутом магнітного запізнення.

Для визначення параметрів схеми заміщення реальної котушки її підключають до джерела синусоїдної напруги (рис. 13.6).

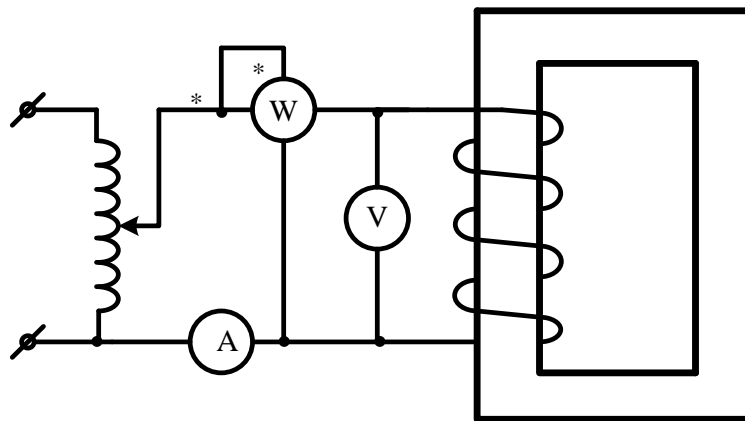


Рис. 13.6

Використовуючи покази приладів, за відомими формулами розраховують:

$$Z_e = \frac{U}{I}, \quad R_e = Z_e \cos \varphi_e, \quad X_e = Z_e \sin \varphi_e$$

$$\varphi_e = \arccos \frac{P}{UI}. \quad (13.3)$$

Активний опір  $R_e$  враховує сумарні втрати у котушці – втрати в обмотці  $R$  та в осерді  $R_0$ :

$$R_e = R + R_0.$$

Для визначення активного опору обмотки  $R$ , коло (рис. 13.6) під'єднують до джерела постійної напруги. При цьому магнітний потік у осерді  $\Phi_0 = \text{const}$ , відповідно  $e_0 = -\frac{d\Phi_0}{dt} = 0$  і вихрові струми в осерді не наводяться.

Втрати на гістерезис також дорівнюють нулю, бо осердя не перемагнічується. За показами вольтметра та амперметра у колі постійного струму визначають активний опір обмотки  $R = \frac{U}{I}$ , після чого можна обчислити значення  $R_0$ , яким враховують втрати потужності в осерді  $R_0 = R_e - R$ .

Індуктивним опором  $X_e$  враховують опір основному магнітному потоку  $X_0$  і опір потоку розсіювання  $X_\sigma$ , тобто  $X_e = X_0 + X_\sigma$ . Розділити  $X_e$  на  $X_0$  і  $X_\sigma$  дуже важко. На практиці для спрощення розрахунків використовують співвідношення  $\frac{X_\sigma}{R} = k$ , де  $k = 1, 2, \dots, 10$ . Менші значення  $k$  відносять до котушок малої потужності, більші — до потужних. Обравши значення  $k$ , отримують значення індуктивного опору розсіювання  $X_\sigma = kR$ . Тоді

$$X_0 = X_e - X_\sigma = X_e - kR.$$

Параметри контуру намагнічування паралельної схеми заміщення котушки (рис. 13.5) знаходять за відомими формулами:

$$G_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}; \quad B_0 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}.$$

Слід відзначити, що параметри еквівалентної схеми заміщення залежать не тільки від даних обмотки котушки та властивостей осердя, але й від частоти напруги.

Як елемент електричного кола котушка з феромагнітним осердям має нелінійну вольт-амперну характеристику  $U = f(I)$ , яка за формою повторює криву намагнічування  $B = f(H)$ . Це пояснюється наступним. В рівнянні (13.2) діюче значення ЕРС  $E_0 = 4.44 f W S B_m$  ( $f$  - частота прикладеної напруги,  $W$  - кількість витків,  $S$  - площа поперечного перерізу осердя,  $B_m$  - амплітудне значення магнітної індукції), а складові  $R \dot{I}_e$  та  $X_\sigma \dot{I}_e$  відносно невеликі, тому діюче значення прикладеної напруги

$$U = E_0 = 4.44 f W S B_m, \text{ тобто } U \sim B.$$

Діюче значення струму в котушці, визначається на підставі закону повного струму

$$I = \frac{Hl}{W} \sim H,$$

де  $H$  - напруженість магнітного поля осердя,  $l$  - довжина середньої лінії осердя.

В даній лабораторній роботі досліджуються характер вольт-амперної характеристики котушки з феромагнітним осердям, повітряний зазор якого регулюється, а також залежності повного, активного та реактивного опорів від

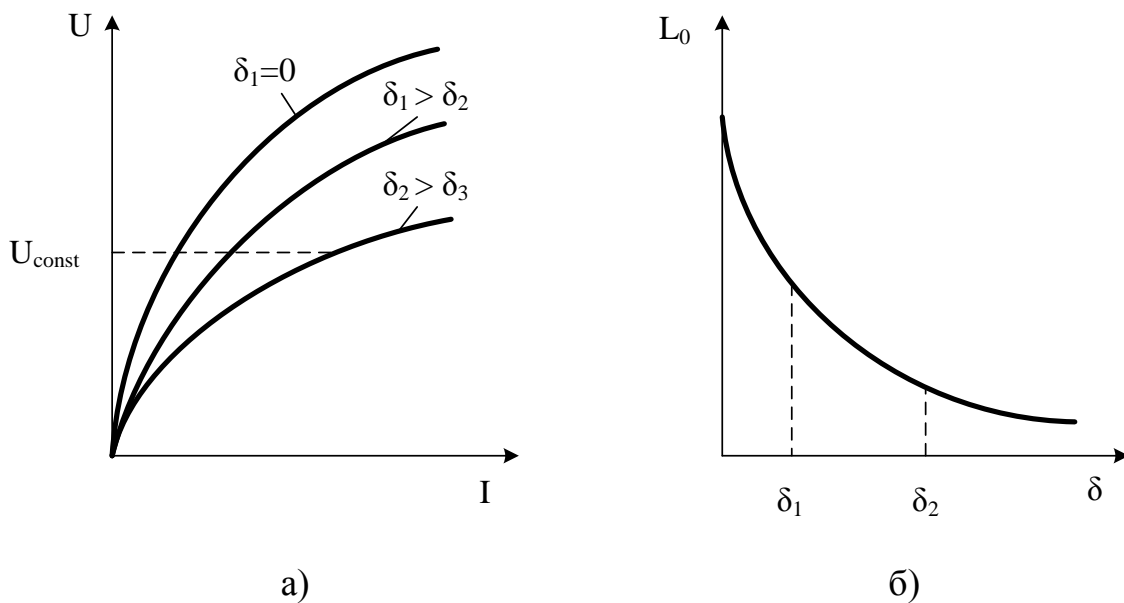


Рис. 13.7

величини прикладеної напруги. Такі котушки використовуються в колах змінного струму в якості елементів, опір яких регулюється. Повний опір котушки залежить від реактивного, який в свою чергу залежить від величини повітряного зазору. На рис. 13.7а подано сімейство вольт-амперних характеристик котушки в залежності від величини повітряного зазору.

Якщо прикладена напруга незмінна  $U = \text{const}$ , то магнітний потік також повинен бути незмінним за рахунок зміни магніторушійної сили або струму в котушці ( $F = IW, W = \text{const}$ ). Збільшення повітряного зазору призводить до зменшення повного опору котушки ( вольт-амперна характеристик зміщується вправо) внаслідок зменшення її реактивного опору в результаті зменшення індуктивності  $L_0$ , що обумовлено основним магнітним потоком  $\Phi_0$  ( $\Psi_0 = \Phi_0 W = L_0 i$ , див. рис. 13.7б).

### 13.2 Порядок виконання роботи

1. Виконати зовнішній огляд котушки, ознайомитися з конструкцією магнітопроводу. Записати технічні дані котушки.

2. Ознайомитись з апаратурою і вимірювальними приладами. Установити їхню відповідність виконуваний роботі.

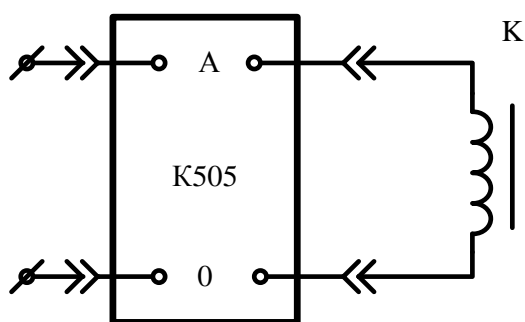


Рис. 13.8

3. Зібрати електричне коло для дослідження котушки з феромагнітним осердям у відповідності до монтажної схеми (рис. 13.8). Регульовані джерела постійної та змінної напруги (0...220 В) встановити в нульове положення, повернувши відповідну ручку проти годинникової стрілки в крайнє положення.

4. Котушку індуктивності підключити до регульованого джерела постійної напруги та зняти вольт-амперні характеристики котушки для трьох значень повітряного зазору феромагнітного осердя. Напругу змінювати від нуля до такого значення, коли струм в котушці буде номінальним з таким розрахунком, щоб отримати шість вимірів. Результати записати в таблицю 13.1.

Перед встановленням повітряного зазору необхідно розмагнічувати феромагнітне осердя. Для цього котушку слід підключити до регульованого джерела синусоїдної напруги, значення якого плавно змінювати від нуля до номінального декілька разів.

Таблиця 13.1

№ з/п	Повітряний зазор, мм	Вимірювані величини	Номери вимірів					
			1	2	3	4	5	6
1	0	U, В						
		I, А						
2		U, В						
		I, А						
3		U, В						
		I, А						

5. Котушку індуктивності підключити до регульованого джерела синусоїдної напруги та зняти вольт-амперні характеристики котушки для трьох значень повітряного зазору феромагнітного осердя. Напругу змінювати від нуля до такого значення, коли струм в котушці буде номінальним з таким розрахунком, щоб отримати шість вимірів. Результати записати в таблицю 13.2.

6. Включити в коло котушки додатковий резистор  $R_d$  (рис. 13.9) і отримати на екрані осцилографа зображення струму котушки. Замалювати осцилограми струму котушки без зазору в магнітопроводі для трьох значень напруги на її затискачах:  $U < U_{ном}$ ,  $U = U_{ном}$ ,  $U > U_{ном}$ .

Таблиця 13.2

№ з/п	Повітряний зазор, мм	Величини для вимірів та обчислень	Номери вимірів					
			1	2	3	4	5	6
1	0	U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						
2		U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						
3		U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						

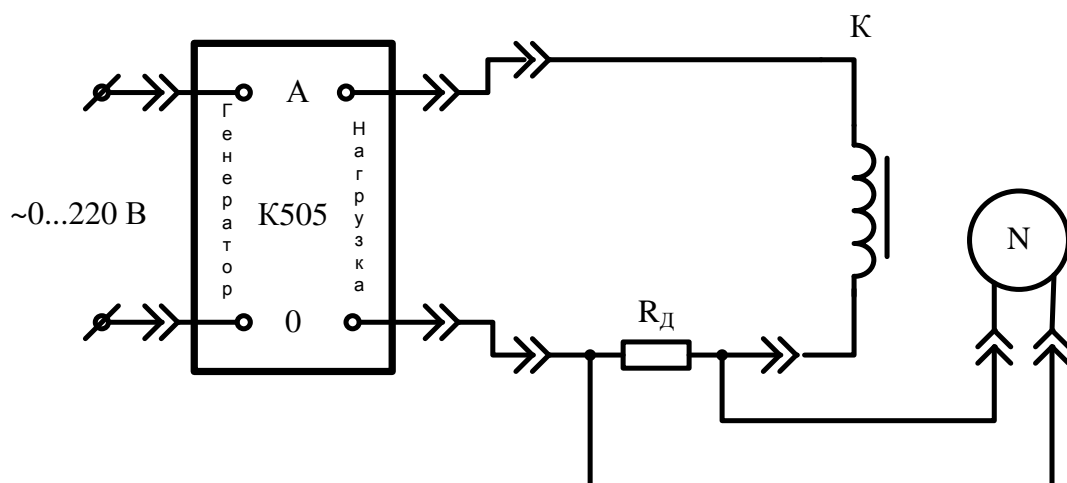


Рис. 13.9

### 13.2 Опрацювання результатів досліджень

1. За результатами вимірювань пп. 4 та 5 побудувати вольт-амперні характеристики  $U = f(I)$  котушки при різних повітряних зазорах в магнітопроводі.
2. За результатами розрахунків табл. 13.2 побудувати графіки залежностей  $Z = f(U)$ ,  $r = f(U)$ ,  $X = f(U)$  в одній системі координат та  $Z = f(\delta)$ ,  $r = f(\delta)$ ,  $X = f(\delta)$ ,  $I = f(\delta)$  в іншій системі координат.
3. За заданими значенням повітряного зазору в осерді та напруги на затискачах котушки розрахувати її параметри.
4. Записати основні висновки за результатами роботи.

### 13.3 Контрольні питання

1. Призначення феромагнітного осердя у котушках індуктивності.



2. Пояснити структуру втрат потужності котушки з магнітопроводом при приєднанні її до джерела постійного та змінного струму.
3. Поясніть причину викривлення синусоїдної форми струму при приєднанні до джерела синусоїдної напруги котушки з магнітопроводом.
4. Запишіть рівняння електричної рівноваги та побудуйте векторну діаграму котушки з магнітопроводом.
5. Намалюйте еквівалентну схему заміщення котушки з магнітопроводом та поясніть фізичний зміст її параметрів.
6. Як зменшити втрати активної потужності у котушці з магнітопроводом?
7. Поясніть характер залежностей повного, активного та реактивного опорів від прикладеної напруги та величини повітряного зазору в магнітопроводі.
8. Приведіть формули для визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення котушки з магнітопроводом.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією однофазного трансформатора і методами його випробування; навчитись знімати основні характеристики трансформатора, визначати параметри еквівалентної схеми і будувати векторну діаграму.

#### 14.1 Основні теоретичні відомості

Трансформатор – найважливіший елемент сучасних енергетичних систем, один із найбільш розповсюджених електротехнічних пристроїв. Він призначений для перетворення електричної енергії однієї напруги (струму) в електричну енергію іншої напруги. Робота трансформатора базується на використанні явища електромагнітної індукції.

Основні частини трансформатора – замкнений феромагнітний магнітопровід і обмотки. Магнітопровід складається з окремих ізольованих листів трансформаторної сталі, товщина яких на частоті 50 Гц складає 0,35 або 0,5 мм. Магнітопровід зменшує магнітний опір для основного магнітного потоку і збільшує магнітний зв'язок між обмотками.

У залежності від конструкції магнітопроводу трансформатори бувають стержневі, броньові і спеціальні.

Обмотки трансформатора виготовляють з ізольованого мідного або алюмінієвого проводу. Для трансформаторів малої потужності обмотки виконуються концентричними. Обмотка, яка з'єднана з джерелом електричної енергії, називається первинною; обмотка, до якої приєднується електричне навантаження – вторинною.

На рис. 14.1 показано схему однофазного трансформатора з двома обмотками. Підведена до первинної обмотки від мережі змінна напруга  $u_1$  створює в ній струм  $i_1$ . Магніторухійна сила (МРС)  $i_1 W_1$  ( $W_1$  – кількість витків первинної обмотки) збуджує магнітний потік  $\Phi$ . Основна частина  $\Phi_0$  замикається через осердя і пронизує витки обох обмоток. Незначна частина збудженого потоку  $\Phi_{1s}$  на відміну від основного охоплює витки тільки первинної обмотки і замикається в немагнітному середовищі.

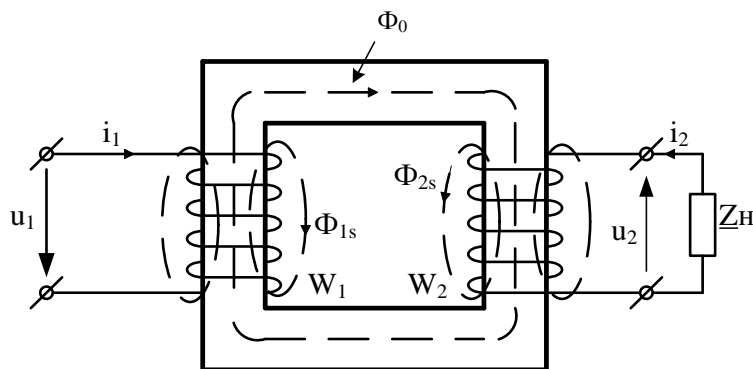


Рис.14.1

Під дією основного магнітного потоку в обмотках, відповідно до закону електромагнітної індукції, індукуються змінні ЕРС:

$$e_{10} = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad e_{20} = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}$$

де  $W_2$  - кількість витків вторинної обмотки.

Відношення ЕРС первинної обмотки до ЕРС вторинної, яке також дорівнює відношенню числа витків обмоток, називають коефіцієнтом трансформації:

$$\frac{e_{10}}{e_{20}} = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{W_1}{W_2} = k$$

Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то під дією ЕРС  $e_{20}$  у ній виникне струм  $i_2$ . Струм вторинної обмотки бере участь у створенні основного магнітного потоку  $\Phi_0$ , а також створює потік розсіювання  $\Phi_{2s}$ , що

замикається в немагнітному середовищі, так само, як і потік розсіювання первинної обмотки  $\Phi_{1s}$ .

Таким чином, струми  $i_1$  і  $i_2$  створюють МРС  $i_1 W_1$  первинної і МРС вторинної  $i_2 W_2$  обмоток, спільна дія яких дорівнює МРС  $i_0 W_1$  ( $i_0$  - струм первинної обмотки в режимі холостого ходу – коло вторинної обмотки розімкнено і струм  $i_2 = 0$ ).

Тому рівняння  $i_0 W_1 = i_1 W_1 + i_2 W_2$  називається рівнянням МРС.

Електромагнітні процеси в трансформаторі описуються рівняннями Кирхгофа для первинної і вторинної обмоток:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{1s} \frac{di_1}{dt} - e_{10},$$

$$e_{20} = R_2 i_2 + L_{2s} \frac{di_2}{dt} + u_2,$$

де  $R_1, R_2$  – активні опори обмоток, що враховують втрати потужності в обмотках (втрати в міді);  $L_{1s}, L_{2s}$  – індуктивності розсіювання обмоток, що враховують потокощеплення розсіювання:

$$\Psi_{1s} = W_1 \Phi_{1s}, \quad \Psi_{2s} = W_2 \Phi_{2s}.$$

Нагадаємо, що для немагнітного середовища справедливе співвідношення  $\Psi = Li$ .

Для зручності розрахунку і порівняння величин, що характеризують процеси в первинній і вторинній обмотках трансформатора, їх приводять до одного числа витків, одержуючи приведений (розрахунковий) трансформатор. Замінивши дійсні величини приведеними і, враховуючи, що струми, ЕРС та напруги змінюються за синусоїдальним законом, можна записати рівняння рівноваги приведенного трансформатора в комплексній формі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1s}) \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_{2s}) \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \end{aligned} \tag{14.1}$$

Цим рівнянням відповідає еквівалентна схема заміщення трансформатора, яку показано на рис.14.2.

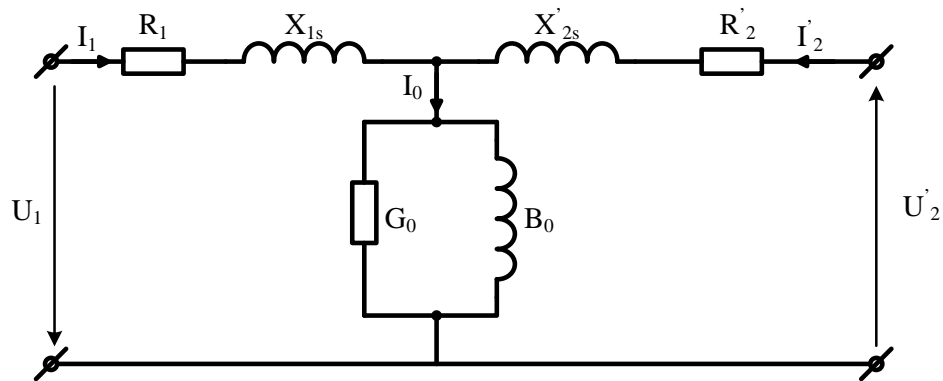


Рис.14.2

В еквівалентній схемі заміщення:  $G_0$  – активна провідність, якою враховують втрати від вихрових струмів і на гістерезис (втрати в сталі);  $B_0$  – реактивна провідність, якою враховують основний магнітний потік;  $X_{1s} = \omega \cdot L_{1s}$  і  $X_{2s} = \omega \cdot L_{2s}$  – індуктивні опори, якими враховують потоки розсіювання  $\Phi_{1s}$  і  $\Phi_{2s}$ ;  $R_1, R_2$  – активні опори обмоток, якими враховують втрати потужності в обмотках (втрати в міді).

Замінюючи реальний трансформатор приведеним, усі параметри первинної обмотки залишаються незмінними. Незмінними, за умовами еквівалентної заміни, є активні, реактивні і повні потужності, а також коефіцієнт потужності вторинної обмотки. З цих умов одержують коефіцієнти приведення (однакові для однойменних величин: ЕРС і напруг –  $k$ , струмів –  $\frac{1}{k}$  і опорів  $k^2$  ( $k$  – коефіцієнт трансформації)).

Приведені величини розраховуються з наступних рівнянь:

$$E'_{20} = E_{20} \cdot k, I'_2 = I_2 \cdot \frac{1}{k}, R'_2 = R_2 \cdot k^2.$$

Дослідження трансформатора і аналіз його роботи в різних режимах проводять за допомогою векторної діаграми (рис. 14.3), що представляє собою векторне рішення рівнянь електричної рівноваги (14.1).

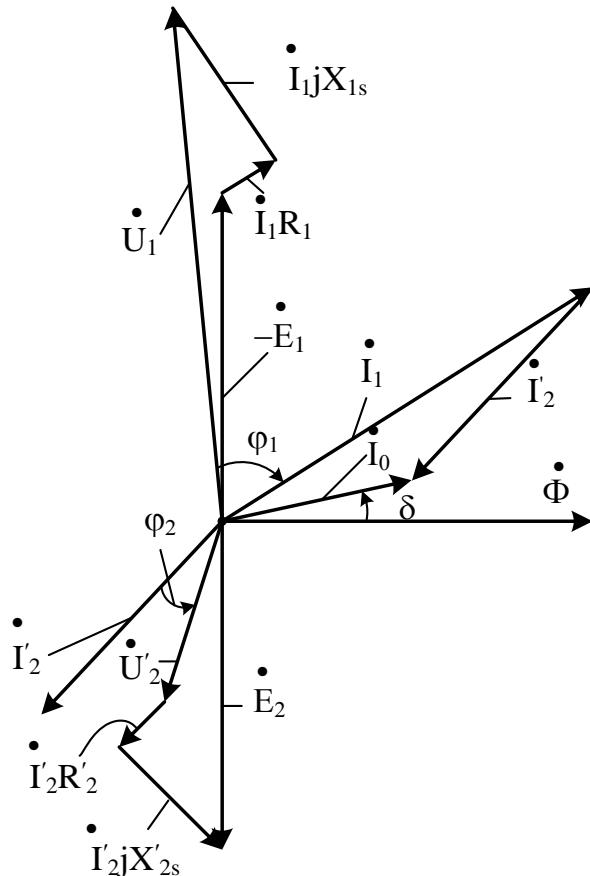


Рис.14.3

Для визначення основних експлуатаційних характеристик трансформатора і параметрів схеми заміщення його досліджують за допомогою дослідів холостого ходу і короткого замикання.

В досліді холостого ходу до первинної обмотки трансформатора підводиться напруга, яка дорівнює номінальній:  $U_{1X} = U_{1ном}$ . Вторинна обмотка трансформатора розімкнена і тому струм у ній відсутній ( $I_2 = 0$ ). У первинній обмотці трансформатора протікає струм холостого ходу  $I_0$ . Він зазвичай

невеликий і складає 4-10% від номінального значення  $I_{1H}$ . Оскільки активний  $R_1$  та індуктивний  $X_{1s}$  опори первинної обмотки, як і струм холостого ходу  $I_0$  незначні, то можна знехтувати спадом напруги на первинній обмотці (складові  $R_1 I_0$  і  $X_{1s} I_0$  в рівнянні електричної рівноваги первинної обмотки малі в порівнянні з  $E_{10}$ ). Тому, еквівалентну схему заміщення трансформатора в досліді холостого ходу можна подати в спрощеному вигляді. (рис. 14.4).

У зв'язку з викладеним очевидно, що  $U_1 \approx E_{10}$ , а  $U_2 = E_{20}$ . Це дозволяє з досліду холостого ходу визначити коефіцієнт трансформації як відношення первинної напруги до вторинної:

$$k = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Для діючих значень ЕРС  $E_{10}$  і  $E_{20}$  справедливі співвідношення:

$$E_{10} = 4.44 f W_1 \Phi_m, \quad E_{20} = 4.44 f W_2 \Phi_m,$$

де  $f$  - частота синусоїдного струму;  $\Phi_m$  – амплітудне значення магнітного потоку трансформатора.

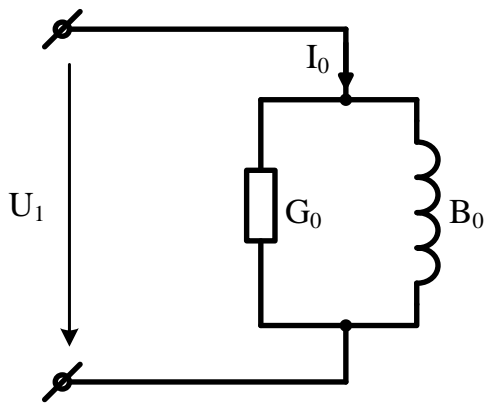


Рис.14.4

Надані вирази дають можливість розрахувати магнітний потік  $\Phi_m$ , а також магнітну індукцію  $B_m$ , якщо відома площа поперечного перетину магнітопроводу  $S$ :

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S}$$

Втрати активної потужності в трансформаторі складаються з втрат у магнітопроводі, обумовлені

гістерезисом і вихровими струмами (втрати в сталі  $P_{CT}$ ) та втрат на нагрівання обмоток трансформатора (втрати в міді  $P_M$ ). Оскільки, за незначного струму холостого ходу втрати в міді первинної обмотки незначні, а у вторинній відсутні зовсім, то приймають, що потужність, яку споживає трансформатор у досліді холостого ходу  $P_{1X}$  і вимірюється ватметром, витрачається на втрати в сталі. Тому за даними досліді холостого ходу визначають параметри  $G_0$  та  $B_0$  еквівалентної схеми заміщення (рис. 14.4).

- Повна провідність схеми заміщення  $Y_0 = \frac{I_{1X}}{U_{1X}};$

- активна провідність  $G_0 = Y_0 \cdot \cos \varphi_{1X}$  ;
- реактивна провідність  $B_0 = Y_0 \cdot \sin \varphi_{1X}$  ;

де  $\varphi_{1X} = \arccos \frac{P_{1X}}{U_{1X} I_{1X}}$ ;

В досліді короткого замикання трансформатора, на відміну від небезпечного режиму короткого замикання, що виникає в аварійних умовах, до первинної обмотки трансформатора підводиться така напруга, за якої в його обмотках виникають номінальні струми. Оскільки в цьому досліді напруга, що підводиться до первинної обмотки, невелика і дорівнює  $U_{1K} \approx E_{1K} = 4,44 f W_1 \Phi_m$ , то магнітний потік трансформатора  $\Phi_m$ , а отже, і магнітна індукція  $B_m$  також будуть невеликими. Це означає, що втрати в сталі, які пропорційні квадратові магнітної індукції  $B_m^2$ , мізерно малі і ними можна знехтувати. Таким чином, вважають, що в досліді короткого замикання активна потужність  $P_{1K}$ , яку споживає трансформатор, витрачається на втрати в міді.

Відзначимо, що струм  $I_0$  значно менше номінального струму  $I_{1H}$ . Тому в схемі заміщення трансформатора, гілкою зі струмом  $I_0$  нехтують, і схема заміщення трансформатора стає спрощеною (рис. 14.5).

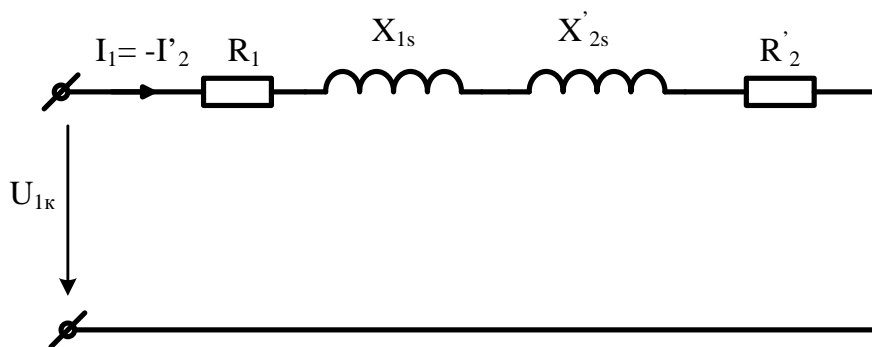


Рис.14.5

Вимірявши напругу, струм і активну потужність в досліді короткого замикання, визначають параметри  $R_1$ ,  $X_{1s}$ ,  $R'_2$ ,  $X'_{2s}$  еквівалентної схеми.



- Повний опір схеми заміщення :  $Z_K = U_K / I_K$  ;
- активний опір  $R_K = Z_K \cos \varphi_{1K}$  ;
- реактивний опір  $X_K = Z_K \sin \varphi_{1K}$  ; де  $\varphi_{1K} = \arccos \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}}$ .

Розділити  $R_K$  та  $X_K$  відповідно на  $R_1$  і  $R'_2$ ,  $X_{1S}$  і  $X'_{2S}$  важко. Зазвичай схему заміщення вважають симетричною, тому  $R_1 = R'_2 = R_K/2$  та  $X_1 = X'_2 = X_K/2$ .

До основних характеристик трансформаторів відносяться зовнішня характеристика, що представляє залежність напруги на затисках вторинної обмотки  $U_2$  від струму навантаження  $I_2$ , і робочі характеристики, що представляють залежність коефіцієнта корисної дії (ККД)  $\eta$  і коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_1$  від струму навантаження  $I_2$ , за умови  $U_1 = U_{1H} = \text{const}$ ,  $f_1 = f_{1H} = \text{const}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ . Типовий характер цих залежностей показано на рис. 14.6.

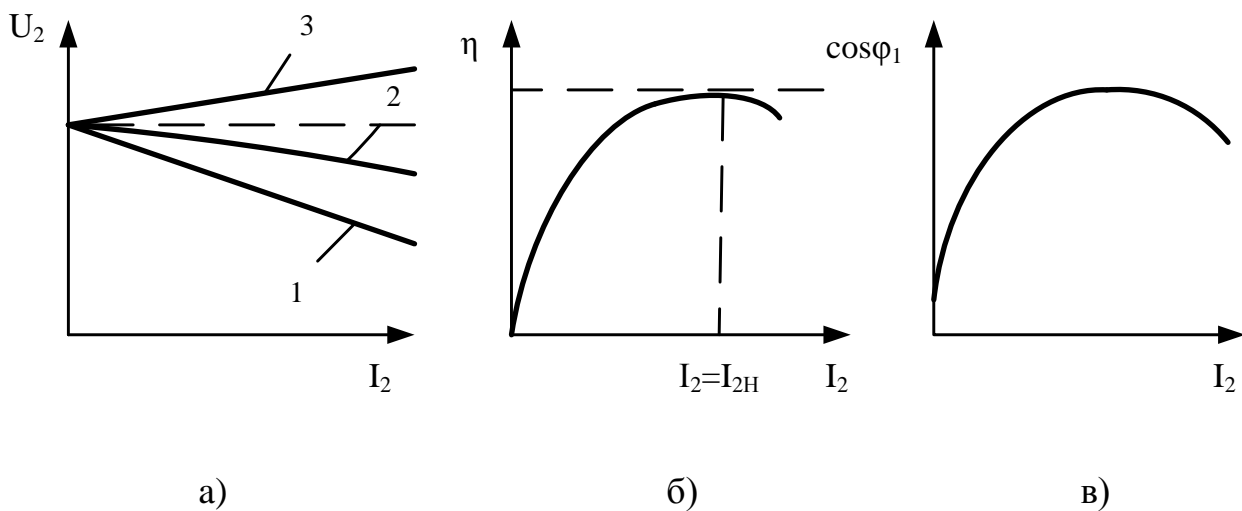


Рис.14.6

Записавши рівняння електричної рівноваги для вторинної обмотки трансформатора відносно напруги на ній, отримаємо рівняння для зовнішньої характеристики трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  у векторній формі:

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_{20} - (R_2 + jX_{2S})\vec{I}_2.$$

З цього виразу слідує, що зміна струму навантаження  $I_2$  приводить до зміни напруги за рахунок спаду напруги на вторинній обмотці.

Зверніть увагу на те, що вторинна обмотка, відносно навантаження, може бути представлена джерелом електроенергії, а її повний опір  $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{2S}$  внутрішнім опором цього джерела.

Вигляд зовнішньої характеристики залежить від характеру навантаження. Аналізуючи векторну діаграму трансформатора з активно-індуктивним навантаженням (рис. 14.3), можна встановити, що спад напруги на його вторинній обмотці тим більше, чим більше виражено її індуктивний характер (крива 1 на рис. 14.6,а). Можна показати, що у випадку суто активного навантаження зовнішня характеристика буде більш жорсткою (крива 2, на рис. 14.6,а). Коли навантаження трансформатора має ємнісний характер, напруга на затискачах вторинної обмотки зі збільшенням струму навантаження також збільшується (крива 3 на рис. 14.6, а).

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора дорівнює відношенню корисної потужності до потужності, яка споживається з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

ККД трансформаторів дуже високий (0,95...0,995), тобто різниця величин  $P_1$  і  $P_2$  приблизно дорівнює похибці вимірювальних приладів, тому його рекомендується визначати розрахунковим шляхом (користуючись паспортними даними трансформатора та даними дослідів холостого ходу і короткого замикання). Зазвичай вводять коефіцієнт завантаження трансформатора  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$  і вираз для ККД, що дозволяє визначати його для різних значень навантаження, записують у такому вигляді:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_C + \beta^2 P_M},$$

де  $S_H$  - номінальна потужність трансформатора;  $P_C$  – потужність втрат у сталі (її визначають з досліду холостого ходу);  $\beta^2 P_M$  - потужність втрат в обмотках трансформатора (втрати в міді) (тут  $P_M$  - втрати в міді при номінальних струмах, які визначаються з досліду короткого замикання).

Якщо навантаження відсутнє, тобто в режимі неробочого ходу, ККД дорівнює нулю, тому залежність  $\eta = f(I_2)$  буде виходити з початку координат (рис. 14.6,б). При малих значеннях навантаження, коли втрати в міді незначні, а втрати в сталі приблизно дорівнюють корисній потужності, значення ККД буде невеликим. Відзначимо, що втрати в сталі не залежать від навантаження, у той час як втрати в міді зростають пропорційно квадратові струму. ККД має найбільше значення за умови однакових втрат в міді та сталі. З подальшим зростанням навантаження ККД трансформатора буде трохи знижуватися.

Характер зміни коефіцієнта потужності трансформатора  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$  (рис. 14.6,в) пояснюється наступним чином. Характеристика виходить не з початку координат, а із точки з ординатою, що відповідає коефіцієнтові потужності в режимі холостого ходу. Зі збільшенням навантаження ця залежність різко зростає і досягає максимального значення, а потім трохи зменшується. Характер цієї залежності можна пояснити, аналізуючи векторну діаграму трансформатора (рис. 14,3) приблизно за наступною схемою. Збільшення струму навантаження  $I_2$  викликає одночасне збільшення струму первинної обмотки  $I_1$ . Оскільки коефіцієнт потужності споживача  $\cos \varphi_1 = \text{const}$ , то зі збільшенням струму  $I_1$  відбувається його зсув у бік вектора  $U_1$ , тому кут  $\varphi_1$  зменшується, а  $\cos \varphi_1$  відповідно збільшується. Однак зростання  $\cos \varphi_1$  відбувається до визначеної межі, тому що подальше збільшення  $I_2$  а, отже, і  $I_1$ , приводить до зростання спаду напруги на первинній обмотці  $(R_1 + jX_1)I_1$ , що призводить до незначного збільшення кута  $\varphi_1$  а, отже, і до відповідного зменшення  $\cos \varphi_1$ .

## 14.2 Порядок виконання роботи

Зробити зовнішній огляд трансформатора, ознайомитися з розташуванням обмоток вищої і нижчої напруги, конструкцією магнітопроводу.

Паспортні дані записати в табл. 14.1.

Таблиця 14.1

$S_H$ , ВА	$U_{1H}$ , В	$U_{2H}$ , В	Розрахувати	
			$I_{1H}$ , А	$I_{2H}$ , А

2. Ознайомитись з апаратурою і вимірювальними приладами. Встановити їхню відповідність виконуваній роботі.

3. За монтажною схемою (рис. 14.8) скласти електричне коло для дослідження трансформатора (рис. 14.7). В якості навантаження підключити резистори із змінними і постійними параметрами, сумарний опір яких розрахувати з урахуванням того, що струм у вторинній обмотці повинен змінюватися від  $I_2 = 0,25I_{2H}$  до  $I_2 \cong 1,2I_{2H}$ .

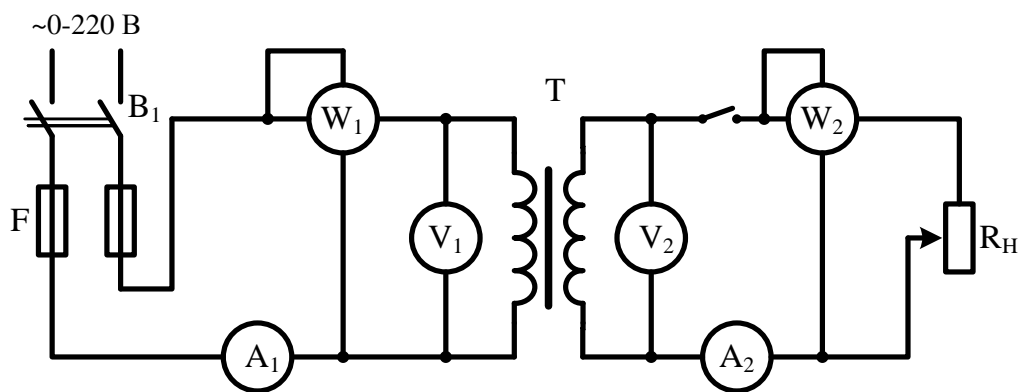


Рис.14.7

4. Виконати дослід неробочого ходу. Для цього розімкнути вторинну обмотку і подати на первинну обмотку трансформатора номінальну напругу

$U_{1H} = 220 \text{ В}$  від регульованого джерела синусоїдної напруги. Покази вимірювальних приладів записати в графу "неробочий хід" табл. 14.2.

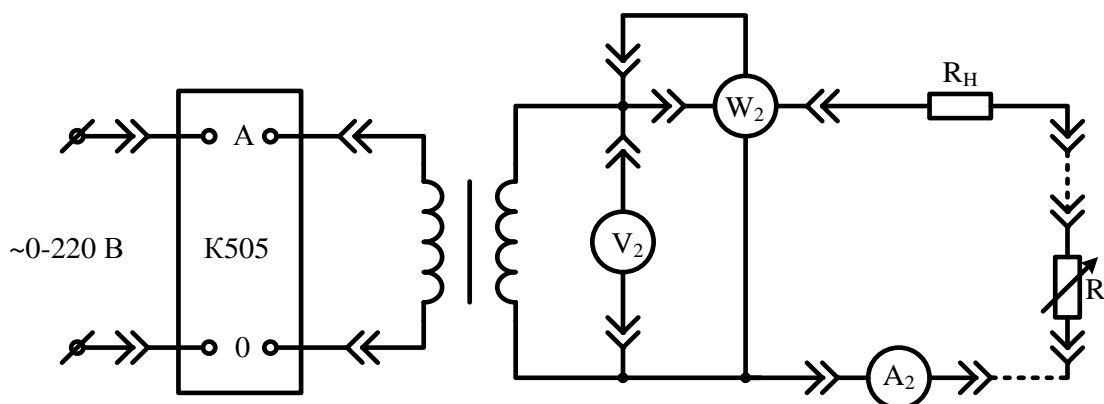


Рис.14.8

5. Випробувати трансформатор при активному навантаженні. Струм навантаження змінювати починаючи з  $I_2 = 0,25I_{2H}$  до  $I_2 \cong 1,2I_{2H}$  з таким розрахунком, щоб одержати шість вимірювань, серед яких повинно бути  $I_2 = I_{2H}$  ( $I_{2H}$  – номінальне значення струму вторинної обмотки трансформатора). Покази приладів записати в графу "Навантаження" табл. 14.2.

Таблиця 14.2

Режим роботи трансформатора		Результати вимірів						Результати розрахунків		
		$I_1, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	$I_2, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$P_2, \text{Вт}$	$\cos \varphi_1$	$\eta$	$\beta$
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Неробочий хід										
Навантаження	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									
Коротке замикання										

6. Виконати дослід короткого замикання. Для цього напругу регульованого джерела синусоїдальної напруги встановити рівною нулю. Зібрати електричне коло, принципову схему якого показано на рис. 14.9. Плавню підвищувати напругу на первинній обмотці трансформатора від нуля до значення, при якому струми в обмотках досягнуть своїх номінальних значень. Покази приладів записати в графу "Коротке замикання" табл. 14.2.

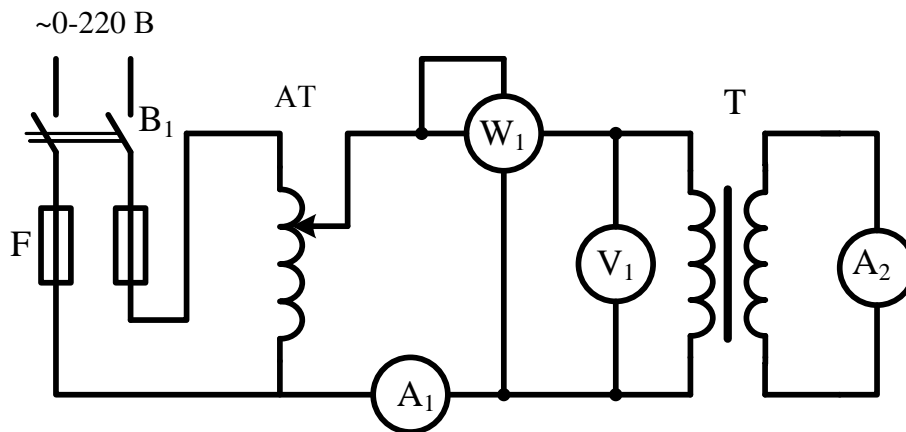


Рис.14.9

### 14.3 Обробка результатів досліджень.

1. Виконати розрахунки згідно табл. 14.3.

2. Накреслити еквівалентну схему заміщення трансформатора і визначити її параметри. Визначити також відносне значення струму холостого ходу

$$I_{1X} \% = \frac{I_{1X}}{I_{1H}} \cdot 100\%, \quad \text{відносне значення напруги короткого замикання}$$

$$U_{1K} \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% \quad \text{і коефіцієнт трансформації. Результати записати в}$$

табл. 14.3.

Таблиця 14.3

Параметри схеми заміщення						Параметри трансформатора		
$R_1, \text{Ом}$	$X_{1S}, \text{Ом}$	$R'_2, \text{Ом}$	$X'_{S2}, \text{Ом}$	$G_0, \text{См}$	$B_0, \text{См}$	$I_{1X}, \%$	$U_{1K}, \%$	$k$

3. Побудувати в загальних координатних вісях робочі характеристики  $\eta = f(I_2)$  й  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ , а також зовнішню характеристику  $U_2 = f(I_2)$  і визначити відносну зміну напруги на затисках вторинної обмотки:

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{2H}} \cdot 100\%$$

де  $U_{2H}$  - напруга на затисках вторинної обмотки при номінальному навантаженні,  $U_{20}$  - напруга холостого ходу.

4. Записати основні висновки за результатами роботи.

#### 14.4 Контрольні питання

1. Призначення, будова та принцип дії однофазного трансформатора.
2. З якою метою і як виконують дослід холостого ходу та короткого замикання?
3. Що таке схема заміщення трансформатора та як визначають її параметри?
4. Від чого залежать ЕРС обмоток трансформатора?
5. Які втрати потужності існують в трансформаторі і від чого вони залежать?
6. Що таке зовнішня характеристика трансформатора та яким чином її отримують?
7. Від чого залежать  $\cos \varphi_1$  та  $\eta$  трансформатора?
8. Пояснити характер зміни зовнішньої та робочих характеристик.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

### ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН З РІЗНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ РОТОРА

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією асинхронного двигуна і методами його випробування; навчитися запускати, зупиняти і реверсувати двигун, знімати і будувати його основні характеристики.

#### 15.1 Основні теоретичні відомості

Асинхронний двигун трифазного струму це електрична машина, що служить для перетворення електричної енергії трифазного струму в механічну (рис. 15.1).

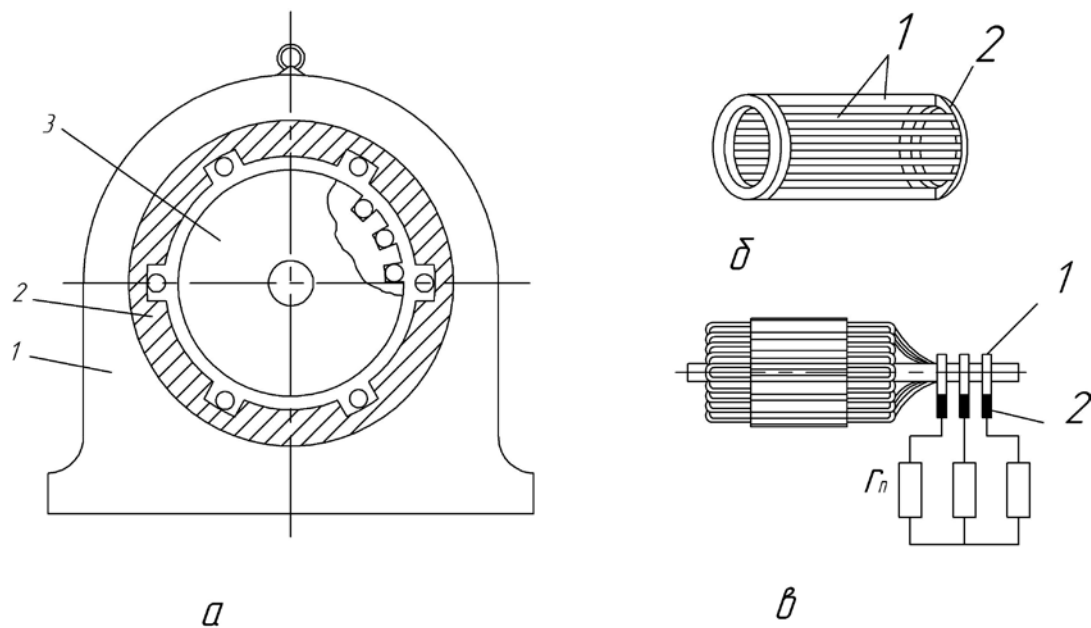


Рис.15.1

Двигун має дві основні частини: нерухому – статор і рухому – ротор. Статор складається з корпусу 1 (рис. 15.1, а), що є основою для всього двигуна. У корпус вмонтовано осердя статора 2, що представляє собою порожній



циліндр, зібраний з пластин електротехнічної сталі, ізолюваних одна від другої шаром лаку. На внутрішній поверхні статора містяться пази, в які укладаються три фазні обмотки змінного струму. Кожна фазна обмотка складається з однієї або декількох котушкових груп, які з'єднані послідовно. Фазні обмотки з'єднують між собою зіркою або трикутником.

Осердя ротора 3 являє собою циліндр, зібраний так само як і осердя статора, з окремих пластин електротехнічної сталі, з пазами на зовнішній поверхні для обмотки ротора. Обмотки ротора бувають двох видів – короткозамкнені (рис. 15.1, б) і фазні (рис. 15.1, в). Відповідно до цього розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкненим і фазним ротором.

Короткозамкнена обмотка складається із мідних або алюмінієвих стержнів 1, розташованих у пазах, і замикаючих кілець 2. Фазну обмотку ротора виконують так само, як і обмотку статора. Фазні обмотки завжди з'єднуються зіркою. Початки фаз обмотки приєднують до контактних кілець 1. Кільця ізолювані одне від одного, а також від валу двигуна. До кілець притискаються пружинами металографітні щітки 2. За допомогою контактних кілець і щіток у коло ротора приєднується пусковий резистор  $R_n$  (рис. 15.1, в). Він призначений для збільшення пускового моменту і одночасно для зменшення пускового струму.

В основу принципу роботи асинхронного двигуна покладено закон електромагнітної індукції. Фазні обмотки статора підключаються до трифазної мережі. Струми обмоток статора збуджують обертове магнітне поле. Частота обертання магнітного поля  $n_1$  залежить від частоти напруги живлення  $f_1$  та

кількості пар полюсів двигуна  $p$ : 
$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

обмотці ротора. В результаті взаємодії струму обмотки ротора, що виникає під дією цієї ЕРС, з обертовим магнітним полем з'являється сила (на підставі закону Ампера), що діє на провідники обмотки ротора. Ця сила створює обертовий момент за напрямом обертання магнітного поля і ротор починає

обертатися з частотою меншою, ніж частота обертання поля статора. Частоту обертання ротора  $n_2$  по відношенню до частоти обертання магнітного поля статора  $n_1$  характеризують відносною величиною, яка називається ковзанням:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (15.1)$$

Для сучасних асинхронних двигунів ковзання складає 0,02...0,06.

Основною характеристикою будь-якого електричного двигуна, що визначає його експлуатаційні можливості, є залежність частоти обертання від електромагнітного моменту  $n_2 = f(M)$ , яка називається механічною (рис. 15.2,б).

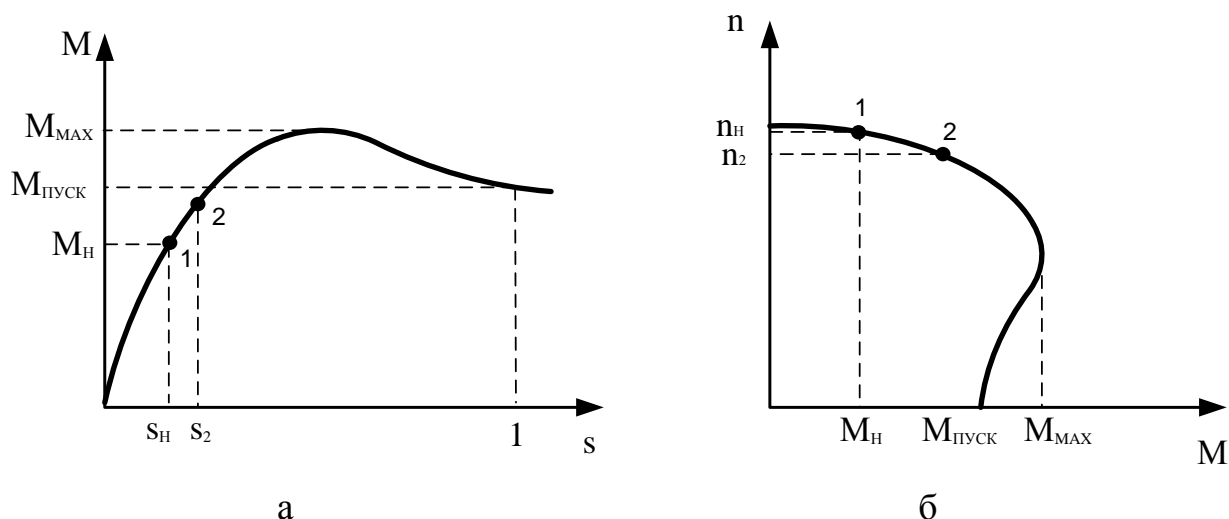


Рис.15.2

За своєю формою механічна характеристика відрізняється від залежності обертового моменту від ковзання  $M = f(s)$ , (рис.15.2 а), тільки положенням відносно координатної системи.

Нехай точка 1 на характеристиках, рис. 15.2, визначає номінальний режим асинхронного двигуна. Момент  $M_H$ , що відповідає номінальному режимові, називається номінальним. Номінальними називають відповідні йому ковзання  $s_H$  і частоту обертання  $n_H$ . В усталеному режимі, тобто при рівномірному обертанні, цей момент дорівнює гальмовому статичному

моментів опору навантаження, наприклад, металорізального верстата. Зі збільшенням моменту навантаження частота обертання зменшується (ковзання збільшується), що призводить до збільшення моменту, який розвивається двигуном. Цей процес закінчиться, коли момент, що розвивається двигуном, стане дорівнювати моментів навантаження, наприклад точка 2. Тоді встановляться частота обертання  $n_2 < n_H$  та ковзання  $s_2 > s_H$ .

Властивість автоматичного встановлення рівноваги між гальмовим статичним моментом навантаження й обертовим моментом двигуна називається саморегулюванням. Легко бачити, що саморегулювання, а от же і усталена робота двигуна можлива, доти – доки момент навантаження буде меншим за максимальний момент двигуна  $M_{\max}$ . У випадку коли момент навантаження стане більшим за максимальний момент двигуна, динамічна рівновага не відновиться і двигун зупиниться. Відношення максимального моменту до номінального  $M_{\max}/M_H$  називають здатністю до перевантаження  $\lambda$  асинхронного двигуна (зазвичай ця величина становить 1,8...2,5).

Про можливості двигуна можна судити за його робочими характеристиками, якими є залежності  $n_2$ ,  $s$ ,  $M$ ,  $I_1$ ,  $\cos\phi_1$ ,  $\eta$  від корисної

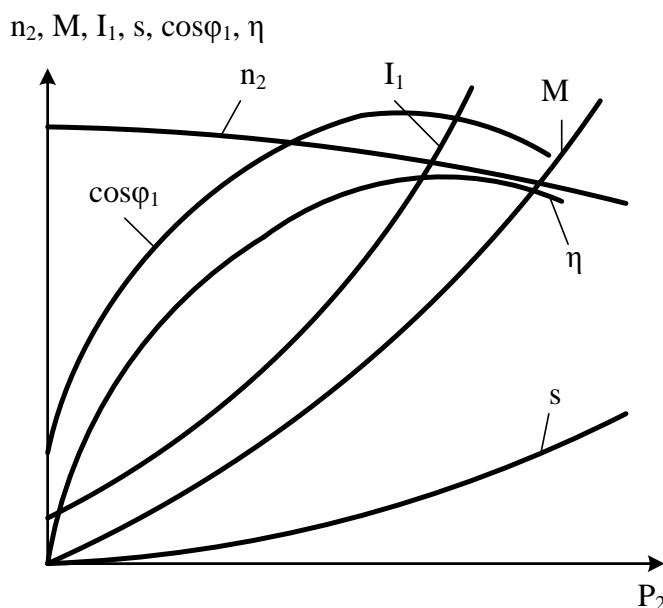


Рис.15.3

потужності  $P_2$  на валу двигуна, коли  $U_1 = \text{const}$  і  $f = \text{const}$  (рис. 15.3).

Ці криві отримують, вимірюючи необхідні величин за різних навантаженнях двигуна, а також на основі результатів дослідження машини в режимі холостого ходу. Простежимо характер зміни цих залежностей зі

збільшенням навантаження двигуна. Одна з них – характеристика обертового моменту:  $M = f(P_2)$ . Відомо, що  $M = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n_2}$  де  $\omega_2$  - кутова механічна швидкість обертання ротора.

Оскільки зі збільшенням потужності  $P_2$  (збільшенням гальмового моменту) частота обертання ротора зменшується, залежність  $M = f(P_2)$  трохи відрізняється від лінійної. Цим також пояснюються характеристики  $n_2 = f(P_2)$  і  $s = f(P_2)$ .

В досліді холостого ходу ( $P_2 = 0$ ) струм статора дорівнює струму холостого ходу ( $I_1 = I_{1X}$ ) і в залежності від величини повітряного зазору може складати 40-60% номінального значення  $I_{1H}$ . З ростом навантаження збільшується струм  $I_2$  в колі ротора, що викликає відповідне збільшення струму  $I_1$  в колі обмотки статора.

Характеристика коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$  показує, як зі збільшенням навантаження змінюється відношення активної потужності  $P_1$ , яку двигун споживає з мережі, до повної потужності  $S_1$ , що враховує і реактивну потужність  $Q_1$ , необхідну для створення обертового магнітного поля,  $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$ . Так, в режимі холостого ходу двигун споживає порівняно велику реактивну потужність  $Q_1$ , активна потужність витрачається тільки на покриття втрат у двигуні. Тому коефіцієнт потужності при холостому ході двигуна незначний (його значення в межах 0,15...0,2). Із підвищенням навантаження збільшується потужність  $P_1$ . У той же час реактивна потужність  $Q_1$  збільшується несуттєво.

Коефіцієнт корисної дії двигуна визначається відношенням корисної потужності на валу  $P_2$  до потужності  $P_1$ , яку двигун споживає з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% .$$

Потужність  $P_1$  дорівнює сумі корисної потужності  $P_2$  і потужності всіх втрат у двигуні. Останню можна розділити на постійну (втрати в осерді статора на гістерезис і вихрові струми), що практично не залежить від навантаження, і змінну (потужність втрат на нагрів провідників обмоток статора і ротора), що залежить від навантаження. Максимального значення ККД досягає, коли змінні втрати дорівнюють постійним. У більшості двигунів цей максимум ККД спостерігається при навантаженні, яке приблизно дорівнює 75% від номінального, оскільки двигуни проектується з урахуванням того, що вони не завжди повністю завантажені.

Наприкінці слід відзначити, що простий, надійний і дешевий асинхронний двигун має істотний недолік – відносно складне регулювання частоти обертання ротора. Можливі способи регулювання частоти обертання  $n_2$  можна встановити в результаті аналізу виразу (15.1), записаного відносно  $n_2$ :

$$n_2 = n_1(1 - s) \quad \text{або} \quad n_2 = \frac{60f}{p}(1 - s).$$

Регулювання частоти обертання зміною ковзання  $s$  пов'язано зі зміною активного опору в колі ротора, тому можливо тільки для двигунів з фазним ротором. Оскільки це призводить до значних втрат потужності в колі ротора, цей спосіб ще і не економічний.

Зміною числа пар полюсів частоту обертання двигуна можна регулювати тільки дискретно. Як приклад складемо таблицю для частоти обертання асинхронних трифазних двигунів промислової частоти  $f_1 = 50$  Гц.

Таблиця 15.1

$p$	1	2	3
$n_1 = \frac{60f_1}{p}$ , об/хв	3000	1500	1000
$n_2 = n_1(1 - s)$ , об/хв	2930	1465	934

Таке регулювання частоти обертання пов'язано зі значним ускладненням обмоток статора та їх переключенням. Вітчизняна промисловість випускає дво-, трьох- і чотирьохшвидкісні асинхронні двигуни.

Регулювання частоти обертання двигунів шляхом зміни частоти напруги можливо за наявності перетворювача частоти.

## 15.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою асинхронного двигуна з фазним ротором, записати в табл. 15.1 його паспортні дані і за ними визначити частоту обертання магнітного поля, число пар полюсів і номінальний момент на валу двигуна.

Таблиця 15.1

$P_H$ , кВт	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$\eta_H$	$\cos \varphi_H$	$n_2$ , об/хв	Розрахувати		
						$n_1$ , об/хв	число пар полюсів	$M_H$ , Н·м

2. Ознайомитися з лабораторною установкою, вимірювальними приладами та апаратами, що застосовуються в роботі.

3. Використовуючи панель із мнемонічною схемою асинхронного двигуна (рис. 15.4), скласти за монтажною схемою електричне коло для зняття механічної і робочих характеристик досліджуваного двигуна.

4. Перевірити нульовий показ приладу для виміру моменту агрегату №1. В разі потреби виконати регулювання ручкою «Балансування моменту».

5. Кнопкою "Включення асинхронної і синхронної машини" на панелі "Синхронна машина" провести пуск асинхронного двигуна.

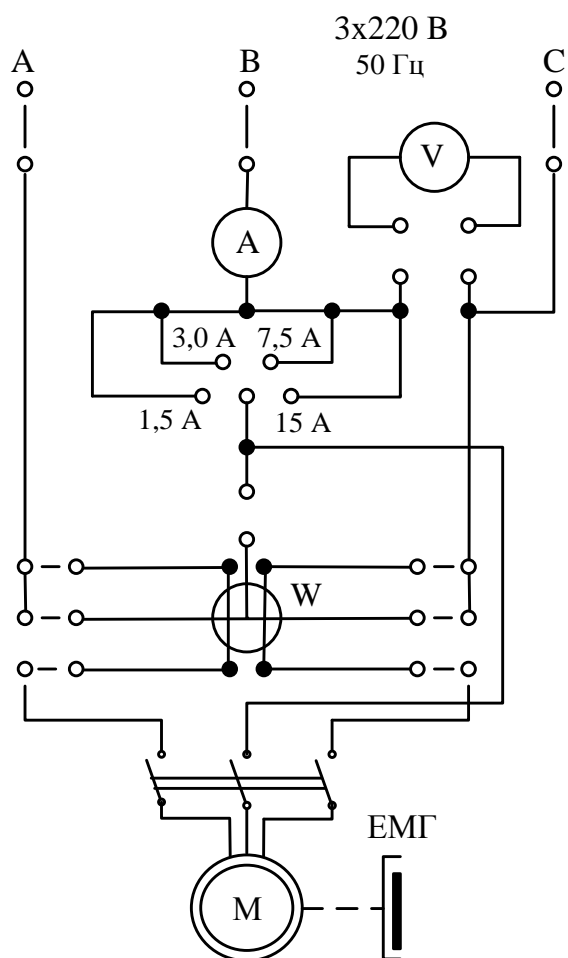


Рис.15.4

6. Ручкою "Регулювання навантаження" змінювати навантаження двигуна від неробочого ходу  $M=0$  до режиму, в якому момент навантаження становитиме  $0,25M_H$ ,  $0,5M_H$ ,  $0,75M_H$ ,  $M_H$ ,  $1,2M_H$ . Результати вимірів для кожного режиму записати в табл. 15.2.

Таблиця 15.2

№ п/п	Результати вимірювань					Результати обчислень							
	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$M, Н\cdot м$	$n_2, об/хв$	$I_{1\phi}$	$M_{\phi}$	$n_{2\phi}$	$s$	$\eta$	$\cos \varphi_1$	$P_2, Вт$	$P_{2\phi}$
1													
2													
3													
4													
5													
6													

### 15.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Виконати обчислення згідно табл. 15.2.

2. За даними табл. 15.2, побудувати в єдиній системі координат робочі характеристики двигуна у відносних величинах, приймаючи за базис номінальні значення:

$$I_{1\epsilon} = \frac{I_1}{I_{1H}}; M_{\epsilon} = \frac{M}{M_H}; n_{2\epsilon} = \frac{n_2}{n_1}; P_{2\epsilon} = \frac{P_2}{P_{2H}}.$$

3. Побудувати механічну характеристику двигуна в іншій координатній системі.

4. Записати основні висновки по роботі.

### 15.4 Контрольні питання

1. Пояснити будову та принцип дії асинхронного двигуна.
2. Від чого залежить частота обертання магнітного поля статора?
3. Як змінити напрям обертання трифазного асинхронного двигуна?
4. Назвіть усі види втрат потужності в асинхронному двигуні.
5. Поясніть характер робочих характеристик двигуна.
6. Поясніть характер механічної характеристики асинхронного двигуна.
7. Які є способи регулювання частоти обертання асинхронного двигуна?
8. Що таке саморегулювання асинхронного двигуна?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 16

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОЇ МАШИНИ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАТОРА

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією синхронного генератора і методами його випробування; навчитися запускати генератор, знімати і будувати його основні характеристики.

#### 16.1 Основні теоретичні відомості

Синхронний генератор – це синхронна машина, яка перетворює механічну енергію первинного двигуна в електричну енергію змінного струму.

Синхронна машина складається з двох основних частин – статора 1 та ротора 2. Будова статора синхронної машини така ж сама, як і статора асинхронної. Ротор являє собою електромагніт, обмотка 3 якого називається обмоткою збудження та живиться від джерела постійної напруги через два ізольованих контактних кільця 4, що закріплені на валу та обертаються разом з ротором. Постійна напруга підводиться до обмотки збудження через нерухомі щітки 5, які мають ковзний контакт із кільцями 4. Існує два типа ротора – явнополісний (на рис.16.1,а  $p=1$ , на рис.16.1,б –  $p=2$ , де  $p$  – кількість пар полюсів) та неявнополісний (рис.16.1,в  $p=1$ ). Полюси у явнополісного ротора виступають. Такий ротор застосовується для тихохідних машин з частою обертання до 1500 об/хв. Обмотка збудження такого ротора має велику кількість витків, які намотуються на осердя полюсів. Для машин з частотою обертання від 3000 об/хв використовують неявнополісний ротор, обмотка збудження якого укладається в пази розташовані на зовнішній поверхні ротора.

Первинними двигунами для синхронних генераторів можуть бути гідротурбіни, парові та газові турбіни і, відносно рідко, двигуни внутрішнього згоряння.

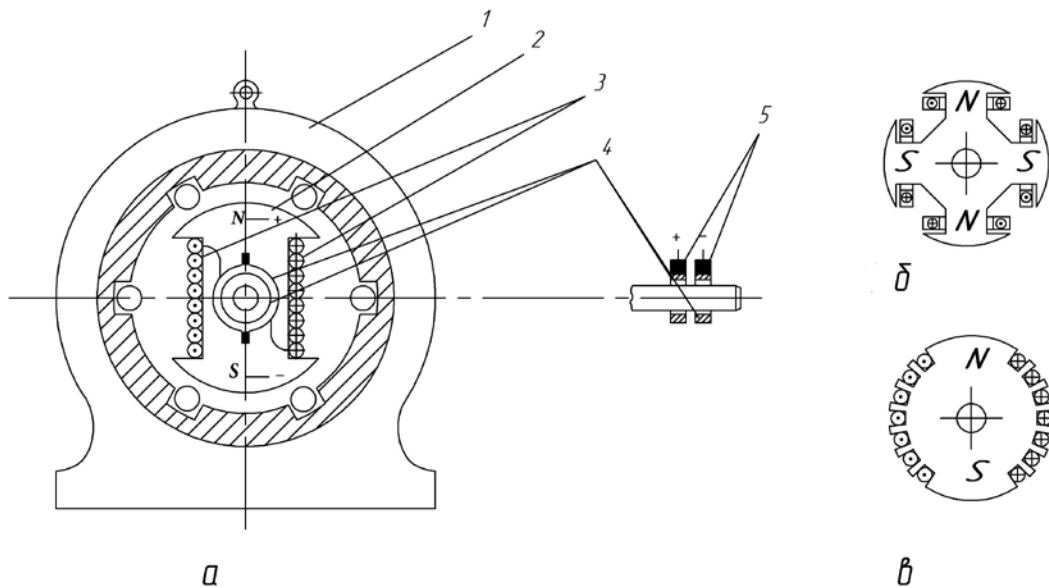


Рис.16.1

В основі принципу роботи синхронних генераторів лежить закон електромагнітної індукції.

Під час обертання ротора за допомогою первинного двигуна магнітне поле полюсів, яке рухається відносно обмотки статора, наводить в її провідниках ЕРС з частотою

$$f_1 = \frac{pn_2}{60},$$

де  $p$  – кількість пар полюсів ротора,  $n_2$  – частота обертання ротора, об/хв.

Якщо до обмотки статора підключити навантаження, в фазах статорної обмотки з'являться струми, які утворюють своє магнітне поле, частота якого становить

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Звідки  $n_2 = n_1$ . Оскільки магнітні поля статора і ротора обертаються з однаковою швидкістю, то вони нерухомі відносно один одного.

В результаті взаємодії поля статора і поля ротора виникає електромагнітний момент, який відповідно до закону Ленца повинен гальмувати рух ротора, оскільки обертання поля ротора спричинює наведення ЕРС і появу струмів у статорі. Цей момент врівноважується обертовим моментом первинного двигуна.

Магнітні поля статора і ротора, які обертаються в просторі з однаковою швидкістю, утворюють результуюче магнітне поле. Якщо струм в обмотці збудження не змінюється, то на результуюче поле впливають тільки струми обмотки статора, які залежать від навантаження генератора. Вплив магнітного поля статора на результуюче магнітне поле називається реакцією якоря (якір – частина машини, що містить обмотку в якій наводиться ЕРС).

Робота синхронного генератора характеризується частотою обертання ротора  $n_2$ , напругою  $U$ , струмом  $I$  однієї з фазних обмоток генератора та струмом збудження  $I_3$ . Залежності двох величин коли дві інші є сталими називають основними характеристиками, які характеризують властивості та особливості генератора і наводяться в довідниках.

Характеристика холостого ходу – це залежність напруги  $U$  на одній з фазних обмоток від струму збудження  $I_3$  за умови сталої частоти обертання та розімкненому зовнішньому колі:

$$U = f(I_3), \text{ коли } n_2 = \text{const}, I = 0$$

Зовнішня характеристика – це залежність напруги  $U$  від струму навантаження  $I$  за умови сталих частоти обертання  $n_2$  та струму збудження  $I_3$ :

$$U = f(I), \text{ коли } n_2 = \text{const} \text{ та } I_3 = \text{const}$$

Регулювальна характеристика – це залежність струму збудження  $I_3$  від струму навантаження  $I$  за умови сталих напруги генератора  $U$  та частоти обертання  $n_2$ :

$$I_3 = f(I), \text{ коли } n_2 = \text{const та } U = \text{const}$$

Регулювальна характеристика показує, як треба змінювати струм збудження, щоб із зміною навантаження напруга генератора залишалася незмінною.

Типові характеристики подано на рис.16.2.

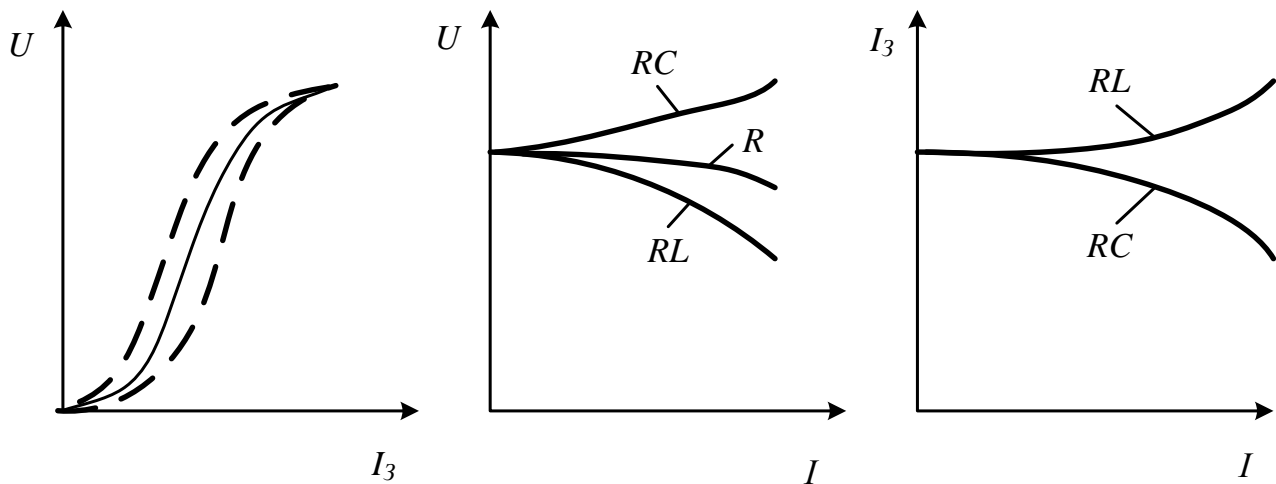


Рис.16.2

Отримані характеристики аналізуються за допомогою рівнянь електричної рівноваги однієї фази синхронного генератора:

$$\underline{E} = \underline{U} + \underline{I}(R + jX_c) \quad \text{або} \quad \underline{U} = \underline{E} - \underline{I}(R + jX_c),$$

$$E = C_E n_2 \Phi_3,$$

де  $E$  – ЕРС наведена в одній з фаз генератора,  $\Phi_3$  – магнітний потік, утворений струмом збудження,  $R$  – активний опір фази обмотки статора,  $X_c$  – синхронний реактивний опір, що враховує потік реакції якоря та потік розсіювання,  $U$  – напруга на фазі генератора.

Знімаючи характеристику холостого ходу, приймають  $I = 0$ . Тоді очевидно, що

$$U = E_3 \sim \Phi_3 = f(I_3),$$

тобто характеристика холостого ходу за формою повторює криву намагнічування магнітного кола генератора. Дослідна характеристика

холостого ходу має дві вітки, що обумовлено впливом гістерезису магнітної системи машини.

Сучасні електротехнічні сталі, з яких виготовляється магнітопровід, характеризуються незначними втратами потужності на гістерезис, внаслідок чого розходження віток характеристики холостого ходу виявляється незначним. Тому, зазвичай, її представлено у вигляді деякої усередненої залежності, як показано на рис. 16.2 суцільною лінією.

Рівняння  $\underline{U} = \underline{E} - \underline{I}(R + jX_C)$  є рівнянням зовнішньої характеристики в комплексній формі, вид якої визначається характером навантаження генератора. Із зростанням струму напруга може як зменшуватись (активне та активно-індуктивне навантаження), так і збільшуватись (активно-ємнісне навантаження). Аналізуючи зовнішню характеристику синхронного генератора, слід врахувати розмагнічувальну дію реакції якоря (якщо навантаження генератора має активно-індуктивний характер) або її намагнічувальну дію (якщо навантаження генератора має активно-ємнісний характер). Напруга генератора змінюється також за рахунок спаду напруги на індуктивному опорі розсіювання та активному опорі обмотки статора.

Слід звернути увагу, що характер регулювальної характеристики напругу залежить від характеру зовнішньої характеристики.

## 16.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з конструкцією статора та ротора генератора і записати основні паспортні дані в табл. 16.1.

Таблиця 16.1

$S$ , кВ·А	$U$ , В	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$f$ , Гц	$n_2$ , об/хв	Визначити	
						кількість пар полюсів	спосіб з'єднання обмоток

2. Ознайомитися з лабораторною установкою, вимірювальними

приладами та апаратами, що застосовуються в роботі

3. Використовуючи панель із мнемонічною схемою «Синхронна машина», за монтажною схемою (рис. 16.3) скласти електричне коло для зняття характеристик синхронного генератора та електричне коло двигуна постійного струму, який є джерелом механічної енергії.

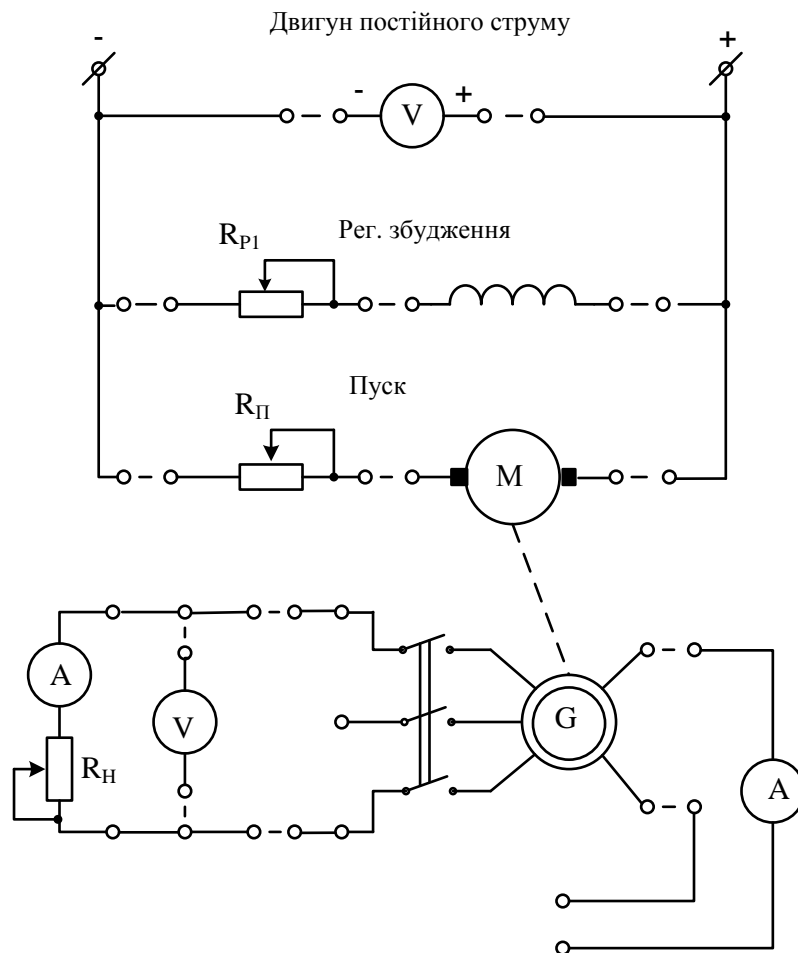


Рис.16.3

4. Підготувати обладнання до проведення дослідження:

- на панелі «Машини постійного струму» встановити перемикач «Пуск двигуна» в положення 1, яке відповідає тах опору пускового реостату;
- на панелі «Машини постійного струму» ручку «Регулювання збудження» повернути за годинниковою стрілкою в крайнє праве положення;

- на панелі «Синхронна машина» ручку «Збудження синхронної машини та генератора постійного струму» повернути проти годинникової стрілки в крайнє ліве положення.

5. Пуск двигуна:

- включити кнопку «Вкл» на панелі «Машини постійного струму»; ручку «Збудження синхронної машини та генератора постійного струму» повернути проти годинникової стрілки в крайнє ліве положення.

- кнопками регулювання «↑» та «↓» встановити 220 вольт на приладі «напруга якоря» (надалі цю напругу підтримувати сталою);

- запустити двигун постійного струму, поступово переключаючи пусковий реостат з max значення (положення 1) до нуля (положення 7).

- ручкою «Регулювання збудження» на панелі «Машини постійного струму» встановити на приладі «Швидкість» агрегату №2 номінальну частоту обертання ротора синхронного генератора і надалі підтримувати її незмінною.

6. Пуск генератора:

- кнопкою «Вкл» позиції «Збудження синхронної машини» підключити ротор генератора до кола збудження;

- кнопкою «Вкл» позиції «Включення статора синхронної машини» підключити до обмоток статора вимірювальні прилади: «струм статора», «напруга статора».

7. Зняти характеристику неробочого ходу генератора  $U = f(I_3)$  за умови  $n_2 = const$ .

Ручкою «Збудження синхронної машини» збільшувати струм збудження від нуля до значення, коли напруга на статорі синхронного генератора складе  $1.2U_H$  (виконати шість-сім вимірів). Значення струму контролювати приладом «збудження синхронного генератора». За цими даними отримати висхідну вітку характеристики. Далі зменшуючи збудження генератора за тих самих значень струму збудження виконати шість-сім вимірів напруги статора і отримати низхідну вітку характеристики. Дані вимірювань записати в табл. 16.2.

Таблиця 16.2

$I_3, \text{A}$								
$\uparrow U, \text{В}$								
$\downarrow U, \text{В}$								

8. Зняти зовнішню характеристику синхронного генератора для активного навантаження  $U = f(I)$  за умов  $n_2 = \text{const}$ ,  $I_3 = \text{const}$ .

Ручкою «Збудження синхронної машини» встановити номінальну напругу генератора. Реостатом навантаження  $R_H$  змінювати струм навантаження  $I_H$  в межах від нуля до значення  $1.2I_H$ , так, щоб отримати шість-сім значень напруги генератора. Результати вимірів напруги генератора і струму навантаження записати в таблицю 16.3.

Таблиця 16.3

$I, \text{A}$							
$U, \text{В}$							

9. Зняти регульовальну характеристику синхронного генератора  $I_3 = f(I)$  за умов  $n_2 = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ .

Ручкою «Збудження синхронної машини» встановити номінальну напругу генератора. Реостатом навантаження  $R_H$  змінювати струм навантаження  $I$  в межах від нуля до значення  $1.2I_H$ , підтримуючи номінальну напругу генератора ручкою «Збудження синхронної машини». Провести шість-сім дослідів. Значення струму збудження  $I_3$  і струму навантаження  $I$  записати в таблицю 16.4.

Таблиця 16.4

$I, \text{A}$							
$I_3, \text{A}$							

### 16.3 Опрацювання результатів досліджень



1. За даними табл. 16.3 - 16.5 побудувати характеристики синхронного генератора.

2. За зовнішньою характеристикою визначити відносну зміну напруги генератора, %:

$$\Delta U \% = \frac{U_x - U_H}{U_x} \cdot 100,$$

де  $U_x = E$  – напруга генератора в режимі холостого ходу;  $U_H$  – номінальна напруга.

3. Записати основні висновки по роботі.

#### 16.4 Контрольні питання

1. Будова трифазного синхронного генератора.
2. Принцип дії трифазного синхронного генератора.
3. Яким чином збуджується генератор?
4. Як регулюється частота та значення наведеної ЕРС?
5. Як залежить напруга генератора від навантаження?
6. Яким чином підтримувати напругу генератора незмінною за зміни навантаження?
7. Поясніть основні характеристики генератора.
8. Як регулюється активна потужність синхронного генератора?
9. Як регулюється реактивна потужність синхронного генератора?
10. Запишіть рівняння електричної рівноваги синхронного генератора та побудуйте відповідну векторну діаграму.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №17

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ І МІШАНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією генератора постійного струму і методами його випробування; навчитися запускати генератор, знімати і будувати його основні характеристики.

#### 17.1 Основні теоретичні положення

Як будь-яка електрична машина, генератор постійного струму складається з двох основних частин (рис. 17.1): нерухомого статора 1 і рухомого ротора 2. Статор складається з товстостінного сталевого циліндра, на внутрішній поверхні якого закріплені полюси 3 з обмоткою збудження 4. Він призначений для створення в міжполюсному просторі постійного магнітного поля та називається індуктором.

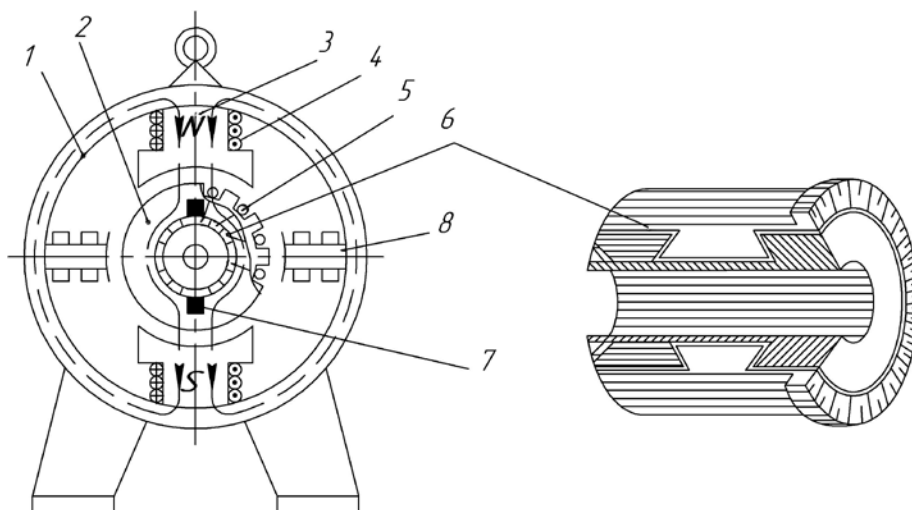


Рис.17.1

Обмотка збудження живиться від окремого джерела постійного струму в генераторах з незалежним збудженням або від цього ж генератора в генераторах із самозбудженням. Самозбудження відбувається за рахунок залишкового магнетизму і тільки за певних умов, у чому варто переконатися на досліді. Обмотка збудження може включатися паралельно або послідовно з обмоткою якоря генератора (у даному випадку вона включена паралельно).

Необхідно звернути увагу на особливості будови ротора машини постійного струму, що називається якорем. Це посаджений на вал набраний з листів електротехнічної сталі циліндр із пазами на зовнішній поверхні, в які укладено провідники обмотки якоря 5.

Поруч із осердям якоря на цьому ж валу знаходиться колектор 6. Це циліндр, що складається з ізольованих одна від одної і від вала мідних пластин, до яких припаяні виводи обмотки якоря. На робочій поверхні колектора розташовується система щіток 7. Однополярні групи щіток з'єднані між собою і від них відходять два виводи обмотки якоря  $Я_1$  і  $Я_2$ .

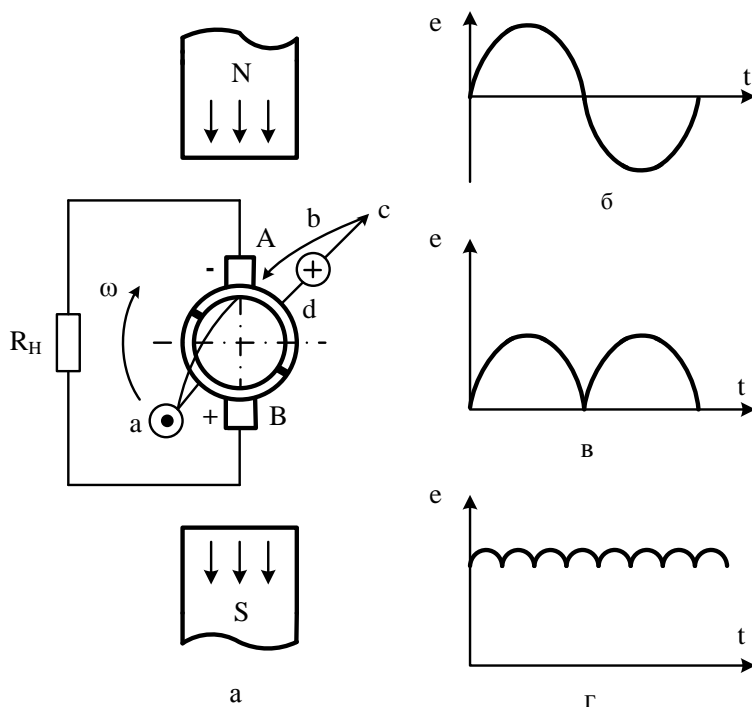


Рис.17.2

Усвідомити призначення колекторно-щіткового вузла, як і принцип роботи генератора загалом, зручно за допомогою ескізу найпростішого генератора (рис. 17.2), що складається з витка  $abcd$ , який розміщено в однорідному магнітному полі. Кожна зі сторін витка з'єднана зі своїм півкільцем, до якого

примикають щітки, За допомогою щіток виток з'єднується з зовнішнім колом.

Якщо виткові надати обертовий момент, у провідниках витка буде індукуватися ЕРС, напрям якої визначається за правилом правої руки. Щітки розташовані таким чином, щоб вони переходили з одного півкільця на інше, коли провідники витка знаходяться на лінії геометричної нейтралі, тобто коли ЕРС у витку дорівнює нулю. Кожна зі щіток буде стикатися з тим півкільцем або, що те саме, з тим провідником, що знаходиться в зоні даного полюса.

Отже, у зовнішньому колі струм буде протікати завжди в одному напрямку, тобто змінна ЕРС у витку (рис. 17.2, б) за допомогою двох півкільць із пов'язаними з ними щітками (колекторно-щіткового вузла) перетвориться в пульсуючу, стосовно зовнішнього кола (рис. 17.2, в). Якщо в якорі укласти не один, а багато витків, то пульсації ЕРС практично зникнуть (рис. 17.2, г). Наявність колекторно-щіткового вузла – відмітна ознака машини постійного струму, і на нього при огляді варто звернути особливу увагу.

Машина має обмотку збудження з великою кількістю витків, виконану тонким ізольованим проводом. Ця обмотка через регулювальний реостат включається паралельно з обмоткою якоря, для чого існують виводи  $B_1$  і  $B_2$  (або  $Ш_1$  і  $Ш_2$ ). Отже, у даному випадку використовується принцип самозбудження, коли обмотка збудження одержує живлення безпосередно від обмотки якоря генератора.

Умови необхідні для самозбудження генератора постійного струму:

- наявність у магнітному колі машини потоку залишкового намагнічування (якщо потік відсутній, то його створюють, пропускаючи через обмотку збудження струм від стороннього джерела);
- збіг напрямку наведеного і залишкового потоків (забезпечується відповідним напрямом обертання якоря і приєднанням до нього обмотки збудження генератора);
- опір у колі обмотки збудження генератора повинний бути менше критичного.

Для поліпшення умов комутації в машині постійного струму, між головними полюсами розташовуються додаткові полюси 8. В малопотужних двополюсних машинах роблять один додатковий полюс. Додаткові полюси малі за розмірами і мають обмотку з невеликим числом витків, по якій протікає струм якоря. Виводи обмотки додаткових полюсів позначають  $D_1$  і  $D_2$ .

Головна мета роботи – навчитися знімати, будувати й аналізувати основні характеристики генератора постійного струму з паралельним збудженням. Робота генератора постійного струму характеризується наступними величинами:  $n$  – частота обертання;  $U$  – напруга на затискачах якоря;  $I$  – струм навантаження;  $I_3$  – струм збудження.

Залежність між двома будь-якими величинами при двох інших постійних дає відповідну характеристику.

Основні характеристики знімаються коли частота обертання є постійною:  $n = n_H = \text{const}$  (рис. 17.3):

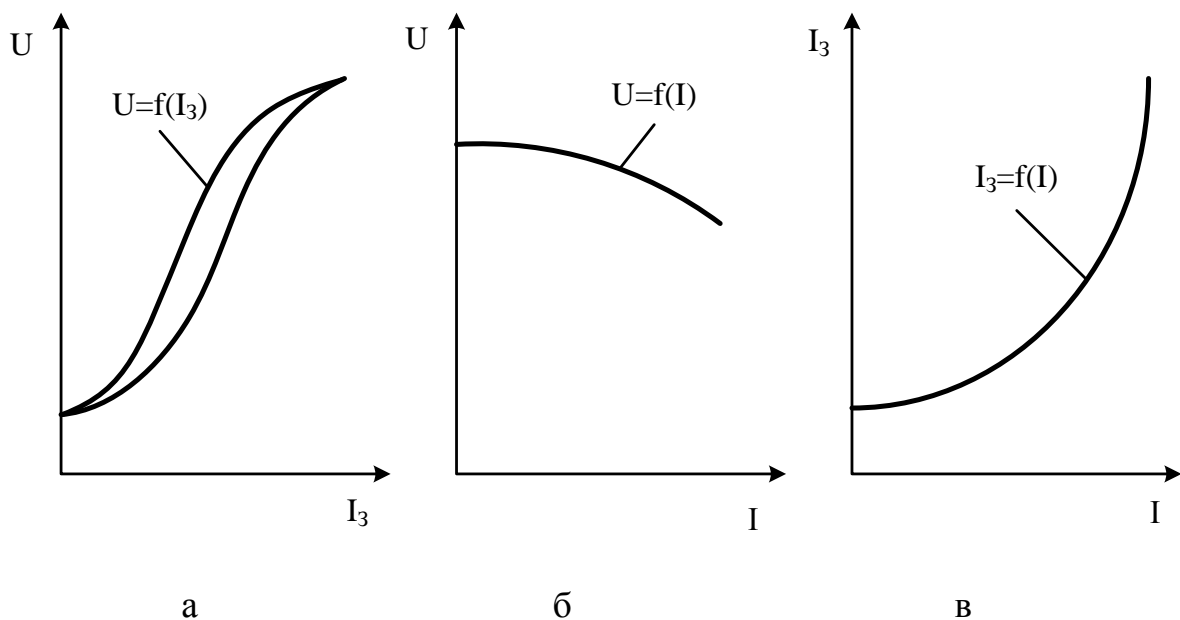


Рис. 17.3

- характеристика холостого ходу  $U = f(I_3)$  для  $n = \text{const}$ ,  $I = 0$ ;
- зовнішня характеристика  $U = f(I)$  для  $n = \text{const}$ ,  $I_3 = \text{const}$ ;

- регулювальна характеристика  $I_3 = f(I)$  для  $n = const$ ,  $U = const$ .

Будова цих характеристик виконуються відповідно до обраних масштабів.

Аналіз характеристик необхідно проводити на базі основних рівнянь, що характеризують роботу генератора постійного струму:

$$E = U + R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad E = C_e n \Phi$$

де  $E$  - індукована ЕРС;  $I_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{я}}$  - відповідно струм і опір обмотки якоря;  $C_e$  - стала, що залежить від обмотувальних даних машини;  $\Phi$  - магнітний потік машини.

Характеристику холостого ходу знімають при відсутності струму навантаження, тому  $U = E = C_e n \Phi$  або  $U \sim \Phi$ ,  $I_3 \sim H$ , оскільки магнітне поле при холостому ході створюється тільки струмом збудження  $I_3$  (як наслідок закону повного струму для магнітного кола генератора  $I_3 W_3 = Hl$ , де  $W_3$  - кількість витків обмотки збудження;  $l$  - довжина магнітного кола). Характеристика холостого ходу  $U = f(I_3)$  повторює за формою криву намагнічування магнітного кола машини  $B = f(H)$ .

Рівняння зовнішньої характеристики впливає з рівняння рівноваги генератора:  $U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ . У робочому діапазоні зовнішня характеристика має вигляд, показаний на рис. 17.3,б. Її зазвичай знімають при сталому опорі кола збудження, тобто коли  $R = const$ . У такому випадку струм збудження не буде сталим, оскільки обмотка збудження живиться від обмотки якоря, а напруга  $U$  на затискачах зі збільшенням струму  $I$  зменшується.

Регулювальна характеристика показує, як слід змінити струм збудження, щоб із зміною струму навантаження генератора, підтримувати сталою напругу на його затискачах. Оскільки зі збільшенням струму навантаження збільшується спад напруги в якорі  $R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ , то для підтримки сталої напруги необхідно відповідно збільшити ЕРС  $E$ . Коли  $n = const$  це можливо тільки за рахунок збільшення струму збудження  $I_3$  (рис. 17.3, в).

## 17.2 Порядок виконання роботи

1. Оглянути генератор, звернувши особливу увагу на устрій полюсів збудження, якоря, колектора і щіткотримача, а також записати основні паспортні дані в табл. 17.1.

Таблиця 17.1

$U$ , В	$I_3$ , А	$n$ , об/хв	$P_H$ , кВт	Система збудження	Число пар полюсів

2. Ознайомитися з лабораторною установкою, вимірювальними приладами та апаратами, що застосовуються в роботі.

3. Зібрати електричне коло для дослідження генератора постійного струму (рис. 17.4) користуючись монтажною схемою (рис. 17.5).

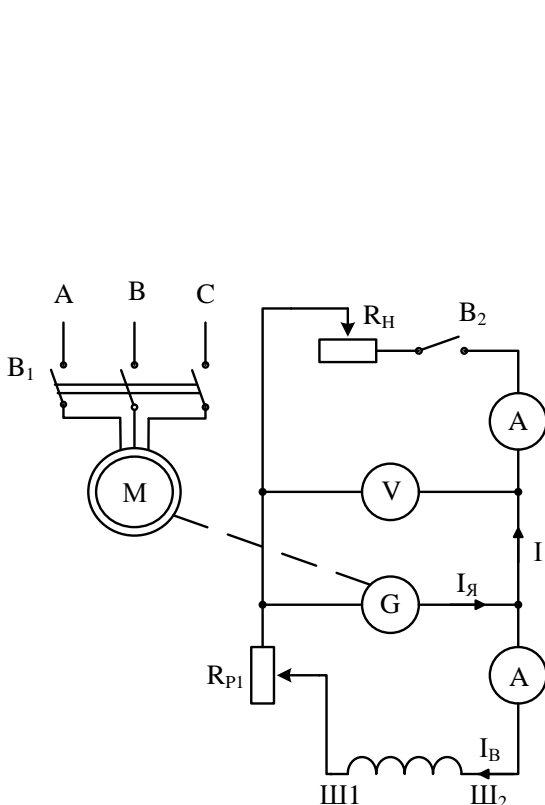


Рис.17.4

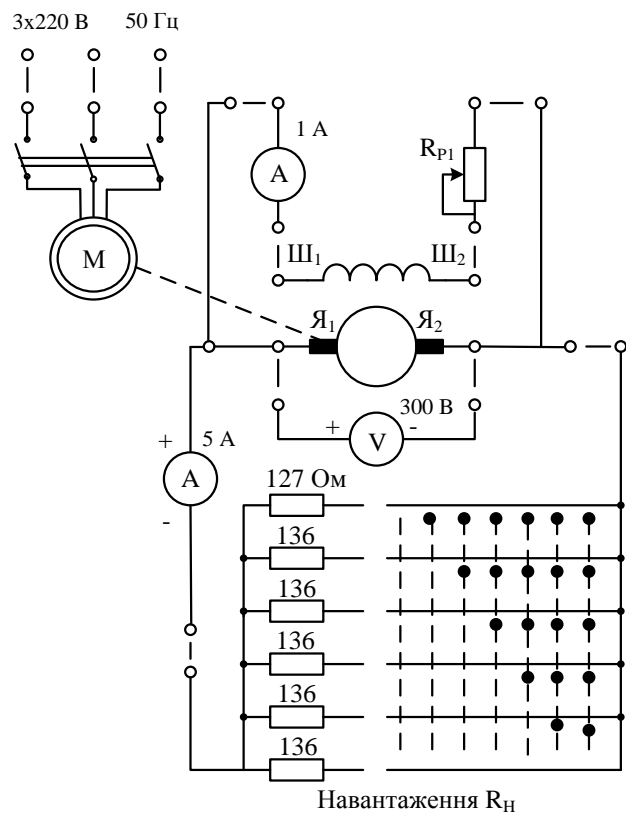


Рис.17.5

4. Встановити перемикач «Навантаження генератора» на панелі "Машини постійного струму" у положення 1; ручку "Збудження синхронної машини і генератора постійного струму" на панелі "Синхронна машина" повернути проти годинникової стрілки в крайнє ліве положення.

5. Кнопкою "Включення асинхронної і синхронної машини", що розташована на панелі "Синхронна машина" запустити асинхронний двигун, який обертає якір генератора.

6. Зняти характеристику холостого ходу.

Ручкою «Збудження синхронної машини і генератора постійного струму» збільшувати струм збудження від нуля (перше вимірювання виконувати при розімкненому колі збудження) до значення, коли напруга на якорі генератора складе  $1.2U_H$  (виконати шість-сім вимірів). Значення струму і напруги контролювати приладами «струм збудження» і «напруга якоря» відповідно.

За цими даними отримати висхідну вітку характеристики. Далі зменшуючи збудження генератора за тих самих значень струму збудження виконати шість-сім вимірів напруги якоря і отримати низхідну вітку характеристики. Дані вимірювань записати в табл. 17.2.

Таблиця 17.2

$I_z, A$						
$\uparrow U, V$						
$\downarrow U, V$						

7. Зняти зовнішню характеристику  $U = f(I)$  генератора за умов  $n = const$ ,  $R_{pl} = const$ .

Ручкою «Збудження синхронної машини і генератора постійного струму» встановити номінальну напругу генератора. Перемикачем «Навантаження генератора» змінювати струм навантаження  $I$  в межах від нуля до значення  $1.2I_H$ , щоб отримати шість-сім вимірів напруги генератора для різних значень



струму. Значення струму і напруги контролювати приладами «струм навантаження» і «напруга якоря» відповідно. Результати вимірів напруги і струму навантаження записати в таблицю 17.3.

Таблиця 17.3

$I, A$						
$U, B$						

8. Зняти регульовальну характеристику  $I_3 = f(I)$  генератора за умов  $n = const, U = const$ .

Ручкою «Збудження синхронної машини і генератора постійного струму» встановити номінальну напругу генератора. Перемикачем «Навантаження генератора» змінювати струм навантаження  $I$  в межах від нуля до значення  $1.2I_H$ , підтримуючи номінальну напругу генератора ручкою «Збудження синхронної машини і генератора постійного струму». Провести шість-сім дослідів. Значення струму збудження  $I_3$  і струму навантаження  $I$  записати в таблицю 17.4.

Таблиця 17.4

$I, A$						
$I_3, A$						

### 17.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Використовуючи дані табл. 17.3-17.5, побудувати в масштабі характеристику холостого ходу, зовнішню і регульовальну характеристики.

2. По зовнішній характеристиці обчислити відносну зміну напруги генератора, %:

$$\Delta U \% = \frac{U_X + U_H}{U_X} \cdot 100\% ,$$

де  $U_X, U_H$  - напруги відповідно при холостому ході і номінальному

навантаженні.

3. Записати основні висновки за результатами виконаної роботи.

#### **17.4 Контрольні питання**

1. Намалюйте докладну електричну схему кіл генератора, яка застосовується в даній роботі.
2. З яких основних частин складається генератор постійного струму?
3. Принцип дії генератора постійного струму.
4. Намалюйте схему магнітного кола генератора.
5. Які умови необхідні для самозбудження генератора?
6. Як регулюється напруга генератора?
7. Яким чином та чому зміняться покази вимірювальних приладів в схемі установки, якщо зменшити опір в колі якоря?
8. Назвіть конструктивну ознаку машини постійного струму.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 18

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** ознайомитися з конструкцією двигуна постійного струму і методами його випробування; навчитися запускати і зупиняти двигун, знімати і будувати його основні характеристики.

#### 18.1 Основні теоретичні положення

Двигун постійного струму принципово побудовано так само, як і генератор. Він складається зі статора (індуктора) і ротора (якоря). Колекторно-щітковий вузол має аналогічну будову, але призначення його інше.

Якщо до щіток підвести постійну напругу, то в провідниках витка буде

протікати постійний струм (рис. 18.1).

На провідники зі струмом, які знаходяться в магнітному полі, будуть діяти електромагнітні сили  $F$ , напрямок яких визначається правилом лівої руки. Сукупність всіх сил утворює електромагнітний момент і виток починає обертатися. Півкільця спільно зі щітками (колекторно-щітковий вузол) перетворюють постійний струм джерела в змінний струм у провідниках витка. Щітки перейдуть з одного півкільця на інше півкільце в момент, коли провідники витка будуть перетинати лінію геометричної нейтралі

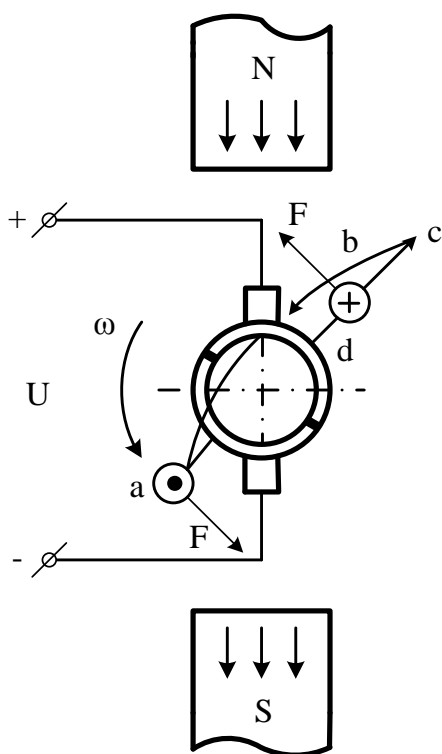


Рис.18.1

(переходити з зони одного полюса в зону іншого).

У двигуні постійного струму з паралельним збудженням, який досліджується в даній лабораторній роботі, обмотку збудження індуктора підключено паралельно до обмотки якоря та мережі постійного струму (рис. 18.2).

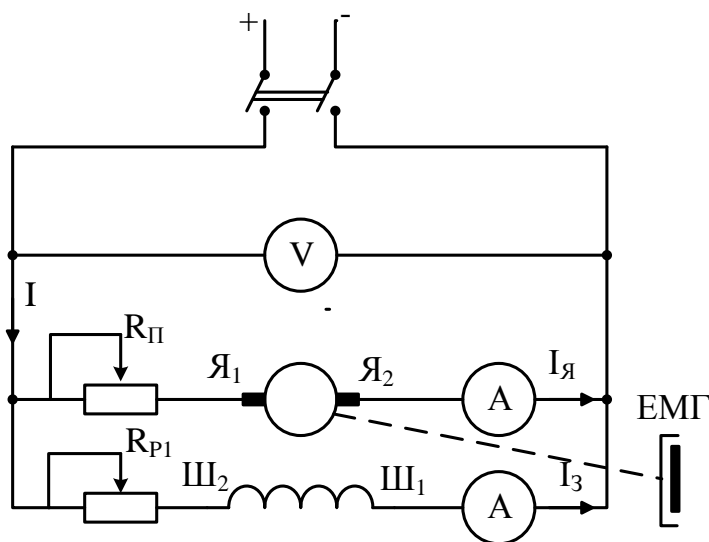


Рис.18.2

У коло обмотки збудження включено регульовальний реостат  $R_{п1}$ , а в коло якоря - пусковий реостат  $R_{п}$ . Реостат  $R_{п1}$  дозволяє змінювати струм збудження двигуна  $I_з$  і його магнітний потік  $\Phi$ . Призначення реостата  $R_{п}$  у колі якоря пояснимо на основі

аналізу основних рівнянь, що описують роботу двигуна.

У відповідності з другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги двигуна для кола якоря має вигляд:

$$U = E + R_{я} I_{я}, \quad (18.1)$$

де  $E$  – ЕРС, що виникає в обмотці якоря.  $E = C_e n \Phi$  ( $n$  – частота обертання якоря;  $C_e$  – коефіцієнт, що залежить від конструктивних елементів машини;  $I_{я}$  – струм якоря).

Обертовий момент, що розвивається двигуном,

$$M = C_M I_{я} \Phi,$$

де  $C_M$  – механічна стала, що залежить від конструкції і числа полюсів двигуна.

З рівняння (18.1) запишемо вираз для струму якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}. \quad (18.2)$$

В початковий момент пуску ( $n=0$ ) ЕРС, що виникає в обмотці якоря дорівнює нулю ( $E=0$ ). У відповідності з (18.2) та враховуючи незначний опір кола якоря, початкове значення пускового струму  $I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$  буде досягати небезпечного для машини значення (до  $4I_{\text{н}}$ ). Саме тому силові двигуни постійного струму завжди вмикають з допомогою реостата в колі якоря і який називається пусковим. В цьому випадку пусковий струм якоря  $I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$  обмежується до безпечного для машини значення (зазвичай до  $2I_{\text{н}}$ ). І тільки зі збільшенням швидкості обертання двигуна, який супроводжується збільшенням ЕРС, опір реостату зменшується до нуля.

Для забезпечення швидкого пуску двигуна, з урахуванням обмеження струму якоря, потік збудження  $\Phi$  роблять максимальним, збільшуючи тим самим пусковий обертаючий момент  $M = C_M I_{\text{я}} \Phi$ . З цією метою опір  $R_{\text{р1}}$  у колі збудження, що регулює струм збудження, встановлюють рівним нулю.

З виразу для обертового моменту випливає, що змінити напрям обертання якоря можна двома способами:

1. змінити напрям струму в якорі, не змінюючи напрямку магнітного поля. Для цього слід поміняти місцями провідники, що йдуть до затискачів якоря  $\text{Я}_1$  і  $\text{Я}_2$ ;
2. змінити напрям струму збудження із збереженням напрямку струму в якорі. Для цього необхідно поміняти місцями провідники, що йдуть до затискачів  $\text{Ш}_1$  і  $\text{Ш}_2$ .

Розглянемо характеристики двигуна з паралельним збудженням, які найбільш у повній мірі визначають його експлуатаційні властивості. Роботу двигуна характеризують: обертовий момент  $M$ , частота обертання  $n$ , потужність на валу двигуна  $P_2 = \omega M$ , струм якоря двигуна  $I_{\text{я}}$  (струм

навантаження) і коефіцієнт корисної дії  $\eta$ . Характеристики отримують дослідним шляхом, змінюючи момент навантаження за допомогою гальмового пристрою.

Частотна (швидкісна) характеристика  $n = f(I_{\text{я}})$  (рис.18.3) знімається за умови сталих напруги  $U = \text{const}$  і струму збудження  $I_z = \text{const}$ . Наведені рівняння дозволяють записати вираз для частотної характеристики:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_e \Phi} \quad (18.3)$$

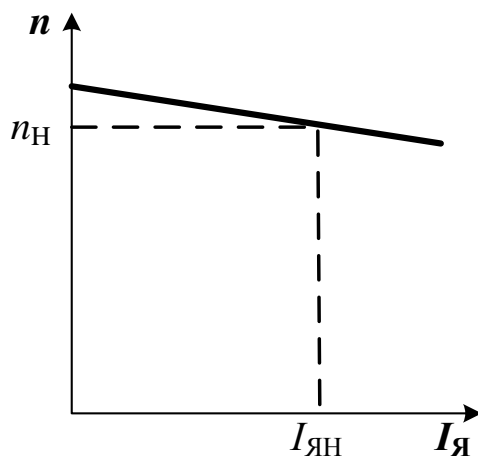


Рис. 18.3

З рівняння (18.3) випливає, що зі збільшенням навантаження на валу двигуна, тобто із збільшенням струму якоря  $I_{\text{я}}$ , частота обертання зменшується пропорційно спаду напруги на опорі кола якоря  $R_{\text{я}}$ . Оскільки опір  $R_{\text{я}}$  малий, то це зменшення незначне, а це означає, що двигун постійного струму з паралельним збудженням має жорстку частотну характеристику.

Аналіз виразу для частотної характеристики показує, що частоту обертання двигунів постійного струму можна регулювати наступними способами: включенням додаткового опору в коло якоря, зміною магнітного потоку  $\Phi$  і зміною напруги  $U$ , що підводиться до двигуна.

Перевагою регулювання частоти обертання включенням додаткового опору в коло якоря, полягає у відносній простоті отримання плавної зміни частоти обертання в широких межах. До недоліків варто віднести значні втрати потужності в додатковому опорі. Змінюючи опір кола якоря, за умови сталої напруги мережі і сталому магнітному потоці, можна отримати сімейство частотних характеристик (рис. 18.4, а).

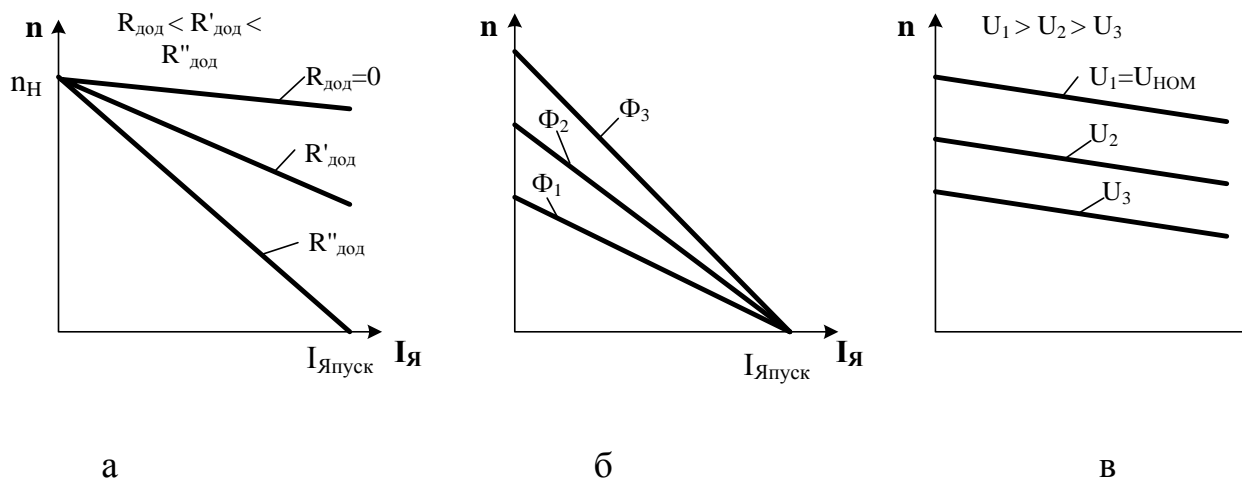


Рис.18.4

Як видно з малюнку, зі збільшенням додаткового опору жорсткість характеристик зменшується.

Регулювання частоти обертання двигуна зміною магнітного потоку найбільш економічне і зручне. Струм збудження незначний,  $I_3 = (1-5)\% I_H$ , тому розміри регулювального реостату і потужність втрат у ньому, також малі. На рис. 18.4б представлено сімейство частотних характеристик при зміні магнітного потоку і сталій напрузі мережі живлення і незмінному значенні опору кола якоря. Як видно з цих характеристик, зі зменшенням магнітного потоку частота обертання ідеального холостого ходу  $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$  ( $I_я = 0$ ) зростає.

Якщо частота обертання дорівнює нулю (режим пуску), то пусковий струм не залежить від магнітного потоку. Для частотних характеристик, що відповідають різним значенням потоку, значення пускового струму буде однаковим. Зі зменшенням магнітного потоку жорсткість характеристик зменшується.

Відзначимо, що у випадку обриву кола збудження ( $I_3 = 0$ ), магнітний потік двигуна знижується до значення, яке дорівнює залишковому магнітному потоку  $\Phi_{зал}$ . В цьому випадку відбувається некероване підвищення частоту

обертання ротору (двигун "іде врозліт"), що являє собою небезпеку як для двигуна, так і для обслуговуючого персоналу.

Широке застосування, особливо в електроприводах, побудованих по системі «генератор – двигун», одержав спосіб регулювання частоти обертання шляхом зміни напруги на затискачах якоря двигуна. Зі зміною напруги живлення, частота обертання холостого ходу, відповідно до наведеного раніше виразу, пропорційна напрузі. Жорсткість сімейства частотних характеристик (рис. 18.4 в) при незмінному опорі в колі ротора буде однаковою для різних значень напруги.

Якщо виразити в рівнянні частотної характеристики (18.1) струм якоря  $I_A$  через електромагнітний момент двигуна  $M = C_M I_A \Phi$ , то отримаємо рівняння механічної характеристики  $n = f(M)$

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{r_A}{C_E C_M \Phi^2} M.$$

Механічна характеристика знімається за мови  $U = const$  та  $I_3 = const$ .

Оскільки електромагнітний момент пропорційний струму якоря (якщо  $I_3 = const$ , відповідно  $\Phi = const$ ), то механічна характеристика двигуна з паралельним збудженням має такий самий вигляд, як і відповідна їй частотна характеристика (рис.18.3).

Робочі характеристики двигунів постійного струму – це залежності частоти обертання  $n$ , моменту  $M$ , струму якоря  $I_A$ , коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від корисної потужності на валу  $P_2$ , тобто  $n, M, I_A, \eta = f(P_2)$  за мови  $U = const$  та  $I_3 = const$ .

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження показано на рис. 18.5. З цих характеристик видно, що частота обертання  $n$  двигуна із збільшенням навантаження трохи зменшується.

Залежність моменту на валу двигуна має вигляд майже прямої лінії, оскільки момент пропорційний навантаженню на валу:  $M = \frac{P_2}{\omega}$ , де  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ .



Скривлення зазначеної характеристики пояснюється зниженням частоти обертання зі збільшенням навантаження. Коли  $P_2 = 0$ , струм якоря дорівнює струму холостого ходу. Із збільшенням потужності струм якоря збільшується приблизно по тій же залежності, що і момент навантаження на валу, тому що за умови  $\Phi = const$ , струм якоря пропорційний моменту навантаження. ККД визначають як відношення корисної потужності на валу до потужності, що споживається з мережі  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ , де  $P_1 = UI$ , а  $P_2 = 0.105Mn$ . Коефіцієнт корисної

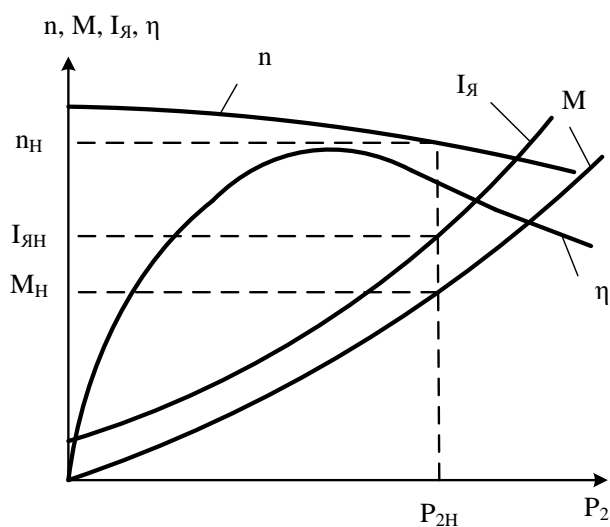


Рис.18.5

дії досягне максимального значення за умови, коли змінні втрати потужності в двигуні будуть дорівнювати постійним втратам: перші включають електричні втрати потужності в колах якоря і збудження, а також механічні втрати; до других відносять втрати потужності в магнітопроводі якоря.

## 18.2 Порядок виконання роботи

1. Вивчити будову двигуна, особливу увагу звернувши на будову полюсів збудження, колектора і щіткотримачів, і записати основні паспортні дані двигуна в табл. 18.1.

Таблиця 18.1

$P$ , кВт	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$I_3$ , А	$n$ , об/хв	Розрахувати
					$M_H$

--	--	--	--	--	--

2. Ознайомитися з лабораторною установкою, вимірювальними приладами та апаратами, що застосовуються в роботі.

3. Використовуючи панель із мнемонічною схемою асинхронного двигуна (рис. 18.6), скласти за монтажною схемою електричне коло для зняття характеристик досліджуваного двигуна.

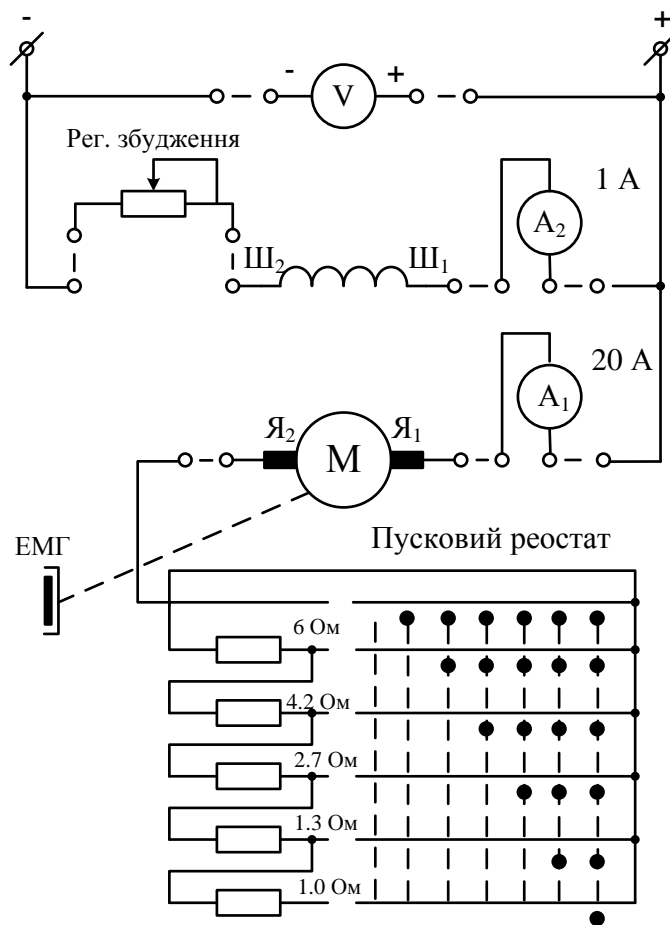


Рис.18.6

4. Перевірити нульовий показ приладу для виміру моменту агрегату №2. В разі потреби виконати регулювання ручкою «Балансування моменту».

5. Пуск двигуна:

- включити кнопку «Вкл» на панелі «Машини постійного струму».

- кнопками регулювання «↑» та «↓» встановити 220 вольт на приладі «напруга якоря» (надалі цю напругу підтримувати сталою);
- запустити двигун постійного струму, поступово переключаючи перемикач «Пуск двигуна» на панелі «Мащини постійного струму» з положення 1 до положення 7.
- ручкою «Регулювання збудження» на панелі «Мащини постійного струму» встановити на приладі «Швидкість» агрегату №2 номінальну частоту обертання якоря двигуна і надалі підтримувати її незмінною.

6. Зняти частотну  $n = f(I_A)$  і механічну  $n = f(M)$ , а також робочі характеристики двигуна  $M = f(P_2)$ ,  $I = f(P_2)$ ,  $n = f(P_2)$ ,  $\eta = f(P_2)$  за умов  $U = const$  та  $I_3 = const$ .

7. Ручкою "Регулювання навантаження" (агрегат №2) змінювати навантаження двигуна від неробочого ходу  $M=0$  до режиму, в якому момент навантаження становитиме  $0,25M_H$ ,  $0,5M_H$ ,  $0,75M_H$ ,  $M_H$ ,  $1,2M_H$ . Результати вимірів для кожного режиму записати в табл. 18.2.

8. Значення струму збудження  $I_3$  визначити з номінального режиму роботи двигуна і записати його значення в табл. 18.1.

Таблиця 18.2

№ з/п	Результати вимірів			Результати обчислень			
	$M$ , Н·м	$n$ , об/хв	$I_A$ , А	$I$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$
1.							
⋮							
7.							

### 18.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Виконати обчислення згідно табл. 18.2.
2. За даними табл. 18.2, побудувати в одній координаційній системі частотну і механічну характеристики, а в іншій координатній системі – робочі

характеристики двигуна у відносних величинах, приймаючи за базис номінальні значення:

$$I_{\epsilon} = \frac{I}{I_H}; M_{\epsilon} = \frac{M}{M_H}; n_{\epsilon} = \frac{n}{n_H}; P_{2\epsilon} = \frac{P_2}{P_{2H}}.$$

3. Записати основні висновки по виконаній роботі.

#### 18.4 Контрольні питання

1. Будова двигуна постійного струму.
2. Принцип дії двигуна постійного струму.
3. Яким чином можливо змінити напрям обертання двигуна?
4. Яким чином здійснюється пуск двигунів постійного струму з паралельним збудженням?
5. Пояснити призначення додаткового опору в колі якоря.
6. Пояснити призначення додаткового опору в колі збудження.
7. Пояснити характер частотної, механічної та робочих характеристик двигуна.
8. Як впливає на роботу двигуна постійного струму з паралельним збудженням обрив кола збудження?

## Зміст

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Набуття вміння складати електричні кола і  
використовувати поширені електровимірювальні прилади 7

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Дослідна перевірка законів Ома та Кірхгофа 15

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідна перевірка принципу накладання струмів 24

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідна перевірка еквівалентних перетворень у колі 29

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Дослідження кола однофазного синусоїдного струму з  
послідовним з'єднанням резистора, індуктивної котушки  
та конденсатора 38

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

Дослідження резонансу напруг у колі синусоїдного  
струму 45

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

Дослідження кола однофазного синусоїдного струму з  
паралельним з'єднанням резистора, індуктивної котушки  
та конденсатора 50

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Дослідження резонансу струмів у колі синусоїдного  
струму 58

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9

Дослідження трифазного електричного кола при з'єднанні  
споживачів зіркою 63

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10

Дослідження трифазного електричного кола, при з'єднанні споживачів трикутником 79

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11

Дослідження перехідних процесу у колі з одним накопичувачем енергії 90

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12

Дослідження нелінійного кола з послідовним, паралельним та мішаним з'єднанням 105

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13

Дослідження індуктивної котушки з феромагнітним осердям 115

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14

Дослідження однофазного трансформатора у різних режимах роботи 127

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №15

Дослідження асинхронних машин з різною конструкцією ротора 141

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16

Дослідження синхронної машини в режимі генератора 150

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №17

Дослідження генератора постійного струму з паралельним і мішаним збудженням 159

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №18

Дослідження двигуна постійного струму 169